

FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO DE GRADO

Nº DE RADICADO: _____

AUTORES PROYECTO:

NOMBRE: JEFFERSON ANDRES LÓPEZ

CODIGO: 065061049

CEDULA: 1.075.219.552

TELEFONO CELULAR: 323 482 2334

CORREO ELECTRONICO: jeffersona.lopezsb@unilibrebog.edu.co



NOMBRE: JUAN PABLO GALEANO GARCIA

CODIGO: 065074001

CEDULA: 1.019.030.986

TELEFONO CELULAR: 315 322 9002

CORREO ELECTRONICO: juanp.galeanog@unilibrebog.edu.co



**Caracterización y análisis fractográfico mediante las técnicas
SEM y DRX en acero SAE 5160, tratado térmicamente mediante
temple y revenidos a diferentes temperaturas**

DIRECTOR: MsC. Mauricio Alejandro Sierra Cetina

PROFESION: Ingeniero Mecánico

MAT PROFESIONAL: CN230-52619

CORREO ELECTRONICO: Mauricioa.sierrac@unilibrebog.edu.co

ESTUDIANTES

DIRECTOR DE PROYECTO

CARACTERIZACION Y ANALISIS FRACTOGRAFICO MEDIANTE
LAS TECNICAS SEM Y DRX EN ACERO SAE 5160, TRATADO
TERMICAMENTE MEDIANTE TEMPLE Y REVENIDOS A
DIFERENTE TEMPERATURAS.

JEFFERSON ANDRES LÓPEZ

JUAN PABLO GALEANO GARCIA

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
INVESTIGACIÓN DE MATERIALES
BOGOTÁ, COLOMBIA
2017

CARACTERIZACION Y ANALISIS FRACTOGRAFICO MEDIANTE
LAS TECNICAS SEM Y DRX EN ACERO SAE 5160, TRATADO
TERMICAMENTE MEDIANTE TEMPLE Y REVENIDOS A
DIFERENTE TEMPERATURAS.

JEFFERSON ANDRES LÓPEZ

JUAN PABLO GALEANO GARCIA

Proyecto de grado presentado como requisito de grado para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director:

Ing. MsC Mauricio Alejandro Sierra Cetina

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
INVESTIGACIÓN DE MATERIALES
BOGOTÁ, COLOMBIA
2017

DEDICATORIA

Después de un arduo trabajo, de estudio e investigación, hemos llegado a una meta que algún día al inicio de nuestra carrera nos propusimos, con dificultades y situaciones que nunca faltan, pero con la ayuda de Dios y de nuestros seres queridos, lo alcanzamos.

Este documento está dedicado también cabe aclarar, al desarrollo de la ciencia de los materiales, ya que su contenido de investigación y desarrollo es de suma importancia para futuras investigaciones, aportando información valiosa a nuevos descubrimientos e innovaciones en la ingeniería en general.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a Dios por darnos la oportunidad de cumplir nuestros sueños, a nuestras esposas Carolina Palacios y Diana Alexandra Bermeo, a nuestros padres Jorney López, Martha L. Betancourth, Julio Hernán Galeano y Ana María Helena Varela, por su gran apoyo y ayuda incondicional, quienes siempre estuvieron ahí brindándonos su sustento, amor y comprensión, para superar muchas de las dificultades durante nuestra preparación como ingenieros.

A nuestras familias, hermanos, suegros y seres queridos más allegados, que de alguna forma nos brindaron su ayuda y colaboración para llegar a ser quien somos el día de hoy.

Agradecemos a la Universidad libre de Colombia sede Bogotá Bosque popular, por tan gran oportunidad que nos dio, abriendo sus puertas para brindarnos una preparación personal y profesional y ser parte del grupo que con orgullo expresan ser profesionales de tan reconocida Universidad.

A nuestro director el Ing. Mauricio Sierra Cetina, quien siempre estuvo dispuesto a ayudarnos y colaborarnos en nuestras preguntas e inquietudes, brindándonos de su gran conocimiento, experiencia, orientación y dirección necesaria para cumplir y plasmar claramente los objetivos de nuestro proyecto de grado.

A todos los profesores que influyeron en nuestra preparación profesional, especialmente al ingeniero, Ricardo Ríos, Gabriel Camargo, Carlos Bohórquez, y Antonio Junco Sánchez, que de forma incondicional aportaron su grano de arena a nuestros conocimientos.

Para finalizar infinitas gracias a nuestros compañeros de estudio con quienes compartimos y vivimos experiencias inolvidables, que marcaron nuestras vidas para siempre.

A todos infinitas GRACIAS.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO.....	10
INTRODUCCION	11
1.0 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	12
1.1. ANTECEDENTES.....	12
1.2. DESCRIPCIÓN.....	12
2.0 JUSTIFICACIÓN	13
3.0 OBJETIVOS	14
4. MARCO TEÓRICO.....	15
4.1. Composición Química del acero SAE 5160.....	15
4.2 Propiedades mecánicas del Acero SAE 5160	15
4.2.1. Propiedades físicas	15
4.2.2. Propiedades Mecánicas	15
4.3. Tratamiento; temperatura en °C y modos de enfriamiento	16
4.4. Características mecánicas.....	16
4.5. Equivalencias.....	16
4.6. Propiedades mecánicas en función de la temperatura de revenido	17
4.7. Diagrama TTT.....	18
4.8. Tratamiento Térmico de Temple.....	19
4.8.1 Tipos de temple.....	19
4.9 Tratamiento Térmico de Revenido.....	21
4.9.1 Revenido de aceros templados.....	21
5.0. PRUEBA DE DUREZA.....	21
6.0 PRUEBA DE ENSAYO CHARPY	22
7.0 METALOGRAFÍA	23
8.0 TÉCNICAS DE MICROSCOPIA.....	24
8.1. Técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	24
8.2. Técnica de difracción de Rayos X (DRX).....	24
9.0 ACERO ALPHA.....	25
10. CONSTITUYENTES DEL ACERO	26
11. EQUIPOS DE LABORATORIO	27

11.1. Equipos de la Universidad Libre.	27
12. ESTADO DEL ARTE	28
13. DISEÑO METODOLÓGICO	31
Fuente: Autores del Proyecto	31
14. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
14.1. DISEÑO EXPERIMENTAL	32
14.2. TABLA DE COMPARACIÓN DE DUREZA-TENACIDAD	35
14.3. GRAFICA TEMPERATURA DE REVENIDO VS DUREZA HRC	36
14.4. GRAFICA TEMPERATURA DE REVENIDO VS TENACIDAD	36
15. ANÁLISIS Y PRUEBAS DE RESULTADOS	37
15.1. Inspección Visual del Ensayo Destructivo Charpy	37
15.1.1. Probeta sin Tratamiento Térmico	37
15.1.2. Probeta a 150°	37
15.1.3. Probeta a 200°	38
15.1.4. Probeta a 250°	38
15.1.5. Probeta a 300°	39
15.1.6. Probeta a 350°	39
15.1.7. Probeta a 400°	40
15.1.8. Probeta a 450°	40
15.1.9. Probeta a 500°	41
15.1.10. Probeta a 550°	41
15.1.11. Probeta a 600°	42
15.2. Caracterización Microestructural	42
15.3. Microscopia Electrónica de Barrido “SEM”	48
15.4. Difracción de Rayos X “DRX”	58
16. CONCLUSIONES	69
17. RECOMENDACIONES	70
18. BIBLIOGRAFÍA	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Composición química	15
Tabla 2 Tratamientos y Modos de Enfriamiento.....	16
Tabla 3 Características mecánicas.	16
Tabla 4 Equivalencias.	16
Tabla 5 Temperaturas y medios de enfriamiento.	17
Tabla 6 Escalas de dureza Rockwell (Tomado de ASTM E 18 - 03).....	22
Tabla 7 Resultados de Pruebas de Dureza HRC.....	35

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama 1. Propiedades mecánicas en función de la temperatura de revenido..	17
Diagrama 2. Diagrama Hierro-Carbono.....	18
Diagrama 3. Temple y Revenido.....	20
Diagrama 4. Temperatura vs. Energía de impacto.....	23

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfica 1. Temperatura de Revenido vs Dureza.	36
Gráfica 2. Temperatura de Revenido vs Energía de impacto.....	36
Gráfica 3. Análisis EDS superficie de fractura acero 5160 a 250°C.....	52
Gráfica 4. Análisis EDS superficie de fractura acero 5160 a 450°C.....	55
Gráfica 5. DRX Acero 5160 templado y revenido a 150°C.....	59
Gráfica 6. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido a 150°C	59
Gráfica 7. DRX Acero 5160 templado y revenido a 200°C.....	60
Gráfica 8. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 200°C.....	60
Gráfica 9. DRX Acero 5160 templado y revenido a 250°C.....	61
Gráfica 10. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 250°C.....	61
Gráfica 11. DRX Acero 5160 templado y revenido a 300°C.....	62
Gráfica 12. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 300°C.....	62
Gráfica 13. DRX Acero 5160 templado y revenido a 350°C.....	63
Gráfica 14. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 350°C.....	63
Gráfica 15. DRX Acero 5160 templado y revenido a 400°C.....	64
Gráfica 16. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 400°C.....	64
Gráfica 17. DRX Acero 5160 templado y revenido a 450°C.....	65
Gráfica 18. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 450°C.....	65
Gráfica 19. DRX Acero 5160 templado y revenido a 500°C.....	66
Gráfica 20. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 500°C.....	66
Gráfica 21. DRX Acero 5160 templado y revenido a 600°C.....	67
Gráfica 22. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 600°C.....	67
Gráfica 23. Acoplamiento DRX a diversas temperaturas de Revenido.	68

TABLA DE IMÁGENES

Imagen 1. Probeta sin tratamiento térmico.....	37
Imagen 2. Probetas a 150°C de Revenido.....	37
Imagen 3. Probetas a 200°C de Revenido.....	38
Imagen 4. Probetas a 250°C de Revenido.....	38
Imagen 5. Probetas a 300°C de Revenido.....	39
Imagen 6. Probetas a 350°C de Revenido.....	39
Imagen 7. Probetas a 400°C de Revenido.....	40
Imagen 8. Probetas a 450°C de Revenido.....	40
Imagen 9. Probetas a 500°C de Revenido.....	41
Imagen 10. Probeta a 550°C de Revenido.....	41
Imagen 11. Probeta a 600°C de Revenido.....	42
Imagen 12. Microestructura estado de entrega acero 5160. 500X.....	43
Imagen 13. Microestructura acero 5160 revenido a 150°C. 500X.....	43
Imagen 14. Microestructura acero 5160 revenido a 200°C. 500X.....	44
Imagen 15. Microestructura acero 5160 revenido a 250°C. 500X.....	44
Imagen 16. Microestructura acero 5160 revenido a 300°C. 500X.....	45
Imagen 17. Microestructura acero 5160 revenido a 350°C. 500X.....	45
Imagen 18. Microestructura acero 5160 revenido a 400°C. 500X.....	46
Imagen 19. Microestructura acero 5160 revenido a 450°C. 500X.....	46
Imagen 20. Microestructura acero 5160 revenido a 500°C. 500X.....	47
Imagen 21. Microestructura acero 5160 revenido a 550°C. 500X.....	48
Imagen 22. Microestructura acero 5160 revenido a 600°C. 500X.....	48
Imagen 23. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 sin T.T.....	49
Imagen 24. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 150°C.....	50
Imagen 25. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 200°C.....	50
Imagen 26. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 250°C.....	51
Imagen 27. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 300°C.....	52
Imagen 28. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 350°C.....	53
Imagen 29. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 400°C.....	54
Imagen 30. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 450°C.....	55
Imagen 31. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 500°C.....	56
Imagen 32. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 550°C.....	57
Imagen 33. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 600°C.....	57

GLOSARIO

Austenización: La formación de austenita por calentamiento de una aleación de hierro por encima de su temperatura crítica superior.

Constituyentes: Unión de varios componentes.

Difracción: Fenómeno por el cual se produce una desviación de los rayos luminosos cuando pasan por un cuerpo opaco o por una abertura de diámetro menor o igual que la longitud de onda.

Elongación: En mecánica es la distancia que, en un instante dado, separa a una partícula o cuerpo sometidos a oscilación de su posición de equilibrio.

Estricción: Es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada.

Fatiga: Disminución de la resistencia mecánica de los materiales al someterlos a esfuerzos repetidos

Fractografía: Es el método por el cual se realiza el análisis de las características de la fractura en un material para conocer sus causas y mecanismos y así conocer los motivos que provocan la falla de materiales

Fricción: Se conoce como fuerza de fricción a la que realiza una oposición al desplazamiento de una superficie sobre otra.

Maquinabilidad: Es una propiedad de los materiales que permite comparar la facilidad con la que pueden ser mecanizados por arranque de viruta.

Metalografía: Es la ciencia que estudia las características micro estructurales o constitutivas de un metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Nariz TTT: También conocido como diagrama TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación), herramienta que nos permite estudiar los tratamientos térmicos.

Nucleaciones: Crecimiento de un cristal a partir de un núcleo.

Precipitación: Fenómeno que se opera cuando un cuerpo en disolución se separa del disolvente y se deposita en el fondo del recipiente.

Segregación: Separación parcial de diversas partes homogéneas de una mezcla durante su licuefacción y aleación.

Solubilidad: Capacidad de una sustancia para formar una solución saturada con otra sustancia.

Topográfica: Ciencia cuyo fin es la descripción y representación detallada de cualquier sector de la superficie terrestre, esquematizando en mapas el relieve y los demás caracteres naturales y artificiales. (Gran Diccionario de la Lengua Española, 2016)

INTRODUCCION

Desde el principio de los tiempos, los materiales metálicos han sido de gran importancia en el diseño estructural y en la fabricación de herramientas, conociendo que dicho material se encuentra en casi todos los desarrollos científicos con respecto a los materiales no-metálicos, los cuales no son capaces de satisfacer las necesidades y exigencias de diseño, aunque también presentan algunos inconvenientes, ya sea por su fabricación, manipulación o uso inadecuado.

Debido al alto nivel de competencia en el sector de la manufactura y entendiendo las situaciones en que están constantemente sometidos los materiales metálicos, nos inspira a ser más competitivos en la industria, a investigar y desarrollar nuevos procesos y descubrimientos en el comportamiento de los aceros, que permita identificar y caracterizar la composición correcta, para el avance y progreso de la ciencia de los materiales.

Uno de los principales factores que afectan directamente los materiales compuestos por hierro y carbono, como el acero, es la temperatura, que dependiendo de su uso puede usarse para mejorar o reducir sus propiedades químicas, físicas y mecánicas.

En este documento se aportara un nuevo conocimiento por medio de un estudio experimental, donde se demostrar mediante tecnologías de microscopia avanzada y difracción de rayos X, como es afectado un material mediante tratamientos térmicos de temple y revenido, reduciendo sus propiedades esenciales para lo que fue fabricado.

Se han hecho innumerables investigaciones sobre este material, pues es muy usado para la fabricación de piezas del sector automotriz, como ballestas, muelles helicoidales, árboles de transmisión y herramientas de corte pues es un material fabricado para que esté constantemente sometido a la fatiga y al desgaste. (Wordpress.com, 2017)

El material a analizar fue debidamente tratado térmicamente con un precalentamiento y un incremento de temperatura para llegar al nivel de austenización del material. Seguidamente fue sometido a análisis de dureza, metalografía, microscopia y difracción para analizar todas sus propiedades.

En este proyecto de grado se quiere plasmar por medio de investigaciones y estudios de laboratorio, un conocimiento y descubrimiento más, que ayude a que la ciencia y la tecnología de los materiales sigan en proceso de crecimiento y evolución, buscando así que este documento llegue a ser de aporte importante para sí.

1.0 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1. ANTECEDENTES

Los aceros 5160 son utilizados en piezas automotrices y herramientas de corte porque es un acero con gran tenacidad, templabilidad, alta resistencia a la fatiga y al desgaste con características ideales para este tipo de trabajos. Las aplicaciones más utilizadas en la industria para este acero son en la producción de barras de torsión y transmisión, muelles, engranajes, amortiguadores y cuchillas de diferentes aplicaciones.

Dicho material será tratado térmicamente en temple con el objetivo de modificar sus propiedades mecánicas considerando los rangos de temperatura y tiempo de calentamiento, para conseguir una amplia gama de durezas y posteriormente con el revenido aliviar tensiones residuales del material.

Las técnicas de análisis y visualización microscópicas, como la técnica (SEM), Se basa en una observación y caracterización de materiales nanométrica y micrométricamente, para obtener imágenes topográficas con resoluciones entre 4 y 20 nm., y la técnica (DRX), Se usa para la identificación y caracterización del tamaño del grano del material y fases cristalinas.

1.2. DESCRIPCIÓN

Las propiedades mecánicas como la dureza y tenacidad han sido durante mucho tiempo uno de los objetivos de la ingeniería de materiales, y esto hace que el acero SAE 5160 compuesto con dichas propiedades, es un acero interesante en estudiar ya que es un acero usado comúnmente en la tecnología automotriz y en herramientas de corte (Adruschitz, 2012).

Se ha demostrado en anteriores estudios, como el de algunas universidades una de ellas, la universidad INCCA de Colombia con la tesis de grado **EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE REVENIDO EN EL ACERO SAE 5160 EN LA RESISTENCIA AL IMPACTO**, y documentos sobre tratamientos térmicos, que el acero SAE 5160 después de hacerle tratamientos térmicos de temple y revenido a diferentes temperaturas según la teoría el material se fragiliza, perdiendo sus propiedades mecánicas que lo caracterizan.

Por esta razón hay un fin común en llegar a validar que la teoría de fragilidad de revenido es verídica, para saber cómo enfrentar las futuras condiciones en que este material pueda estar sometido, ya sean situaciones mecánicas o físicas, y que pueda cumplir con los requerimientos de uso por el cual fue elegido.

2.0 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad el acero es básicamente el material más versátil, práctico, de fácil producción y acceso, con diferentes composiciones químicas y características mecánicas para realizar diferentes trabajos a los que esté sometido.

En cuanto a las industrias que producen los metales, sus aleaciones y formas de aplicación, no pueden dejar al lado cierto control sobre las características de sus productos y relegar la metalografía, pues se dejaría de cumplir con las especificaciones de fabricación y para que fue elaborado (Ornelas, 2013)

Con la caracterización de las diferentes tipos de fracturas y los análisis realizados por las técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido “SEM” Y Difracción de Rayos X “DRX”, se identificara el comportamiento estructural y microestructural que presenta la fragilidad en un rango de temperaturas y así evitar el uso del acero SAE 5160 a ciertas condiciones, donde sus características físicas, mecánicas y químicas son desfavorables para el tipo de usos que tiene este acero.

3.0 OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Identificar y caracterizar fractográfica y estructuralmente el efecto de la temperatura de temple y revenido en acero SAE 5160

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Identificar las variaciones de las propiedades mecánicas después de realizar tratamientos térmicos de temple a 850°C y revenido desde 150°C hasta 600°C con intervalo de temperatura de 50°C.

Establecer el comportamiento del material durante los ensayos de dureza vs tenacidad con respecto a las diferentes temperaturas de revenido.

Analizar por medio de las técnicas SEM Y DRX, los cambios microestructurales en el material después de ser tratados térmicamente.

4. MARCO TEÓRICO

En la actualidad, el acero SAE 5160 tiene campo de acción en la industria automotriz y en herramientas de corte, gracias a sus propiedades mecánicas, físicas y químicas, presenta una resistencia alta al desgaste, soportando las condiciones de temperatura, fricción y fatiga, etcétera, que se encuentran sometidas las herramientas industriales y piezas automotrices. (William F Smith, 2004)

Es un acero de baja aleación, con características similares de un acero al carbono pero con un porcentaje pequeño de cromo. Este elemento adicional de cromo sirve casi exclusivamente para aumentar la templabilidad y con esto aumentar su dureza.

Este material está compuesto de varios elementos químicos como: C (0.60), Mn(.85), Cr(0.80), Si (0.35) Mo(0.06), P(0.30).

4.1. Composición Química del acero SAE 5160.ⁱ

Aceros Aleados						
Grado de Acero	Composición Química de Colada (%)					
SAE	Carbono	Manganeso	Fósforo	Azufre	Silicio	Cromo
	(C)	(Mn)	(P) Max.	(S) Max.	(Si)	(Cr)
5160	0.56/0.64	0.75/1.0	0.035	0.040	0.15/0.35	0.7/0.9

Tabla 1 Composición química
Fuente: (F. Ballen, 2010)

4.2 Propiedades mecánicas del Acero SAE 5160

4.2.1. Propiedades físicas

Cuando se habla sobre puntos críticos superiores se refiere a los puntos de referencia, que sobre ellos se deben calentar las piezas para realizar el tratamiento térmico de Revenido y después su enfriamiento rápido para dar las propiedades de dureza al material tratado.

Punto crítico superior $AC_3 = 765^{\circ}C$

Punto crítico inferior $AC_1 = 708^{\circ}C$

4.2.2. Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas del acero SAE 5160. (community, 2016)

Resistencia a la tracción, máxima = 724 MPa

Resistencia a la tracción, rendimiento = 275 MPa

Módulo de elasticidad = 190-210 GPa

4.3. Tratamiento; temperatura en °C y modos de enfriamiento

Forja	Normalizado	Recocido	Templado	Enfriado	Revenido
900 - 1200°C	870°C	830°C	815 - 840°C	Aceite	Según características requeridas

Tabla 2 Tratamientos y Modos de Enfriamiento.
Fuente: (Nieco, 2012)

4.4. Características mecánicas

Tratamiento	Rp. 0,2	Rm	Dureza			Impacto	A	Z
	Mpa	Mpa	HB	HRc	HV	da j	%	%
Laminado	680	1000	302	32			15	35
Normalizado	600	970	293	31			18	50
Recocido	370	720	217				17	30

Tabla 3 Características mecánicas.
Fuente: (Nieco, 2012)

4.5. Equivalencias

SAE	DIN	UNI	AFNOR	BS	AISI	ASTM
5160	55 Cr 3				5160	5160

Tabla 4 Equivalencias.
Fuente: (Nieco, 2012)

4.6. Propiedades mecánicas en función de la temperatura de revenido

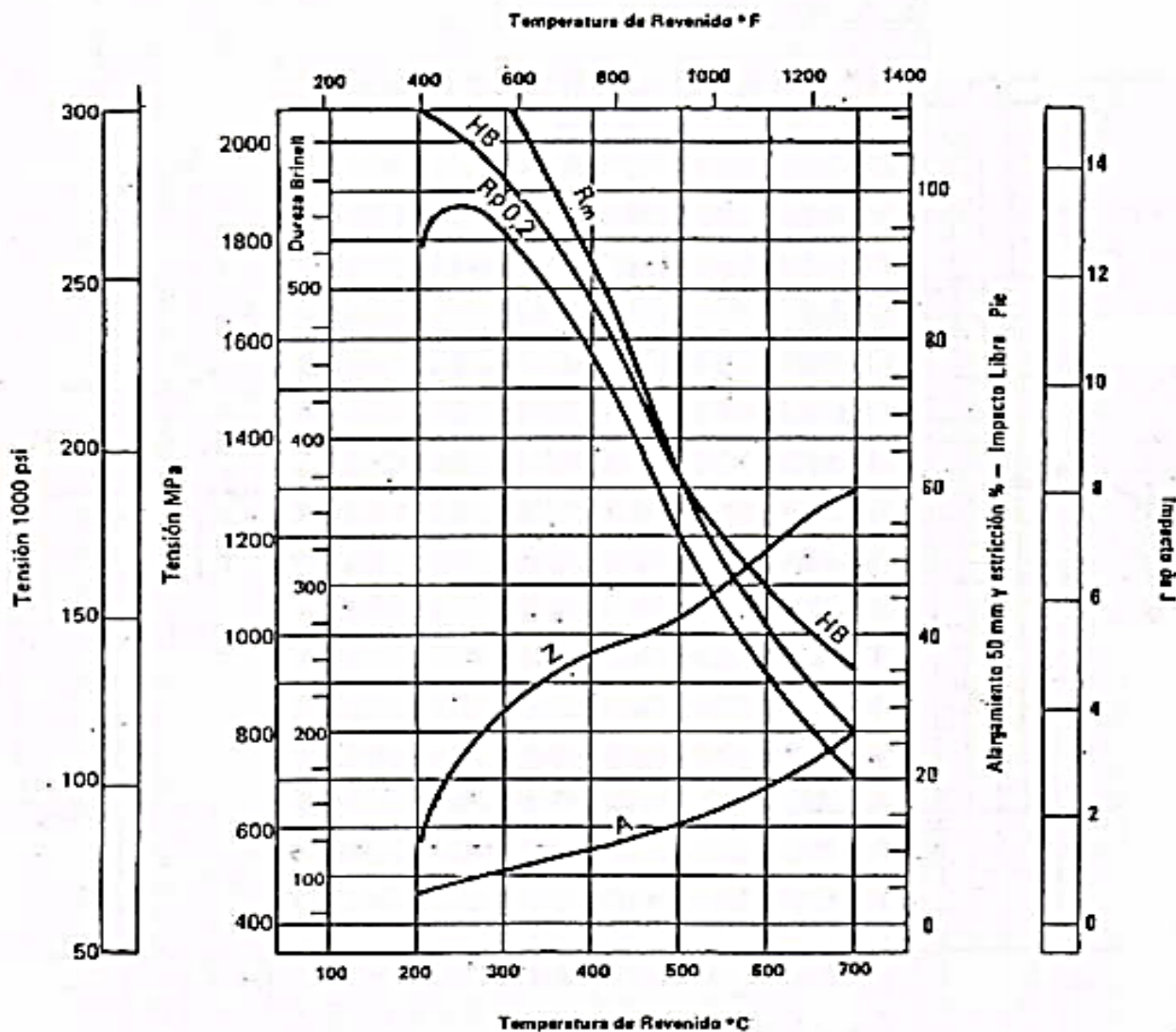


Diagrama 1. Propiedades mecánicas en función de la temperatura de revenido.

Fuente: (M Montoya, 2013)

En el diagrama 1, se hace una comparación entre las propiedades mecánicas en la que se somete un material a Tensión, Impacto y Dureza. En ella se puede observar que durante la temperatura de Revenido, la energía de Impacto o Tenacidad del material, va aumentando, quiere decir que el material va adquiriendo una mayor capacidad de absorción de energía y resistencia a la fractura, no obstante con ello también pierde su dureza y tensión, ya que se va transformando a una fase plástica.

Normalizado	Templado	Medio de enfriamiento
857°C	829°C	Aceite

Tabla 5 Temperaturas y medios de enfriamiento.

Fuente: (Nieco, 2012)

4.7. Diagrama TTT.

En el siguiente Diagrama, el Carbono que muestra la relación entre equilibrios estables de Hierro – Grafito son las líneas discontinuas y las reacciones metaestables de Hierro – Cementita son las líneas continuas. (M. montoya, 2013)

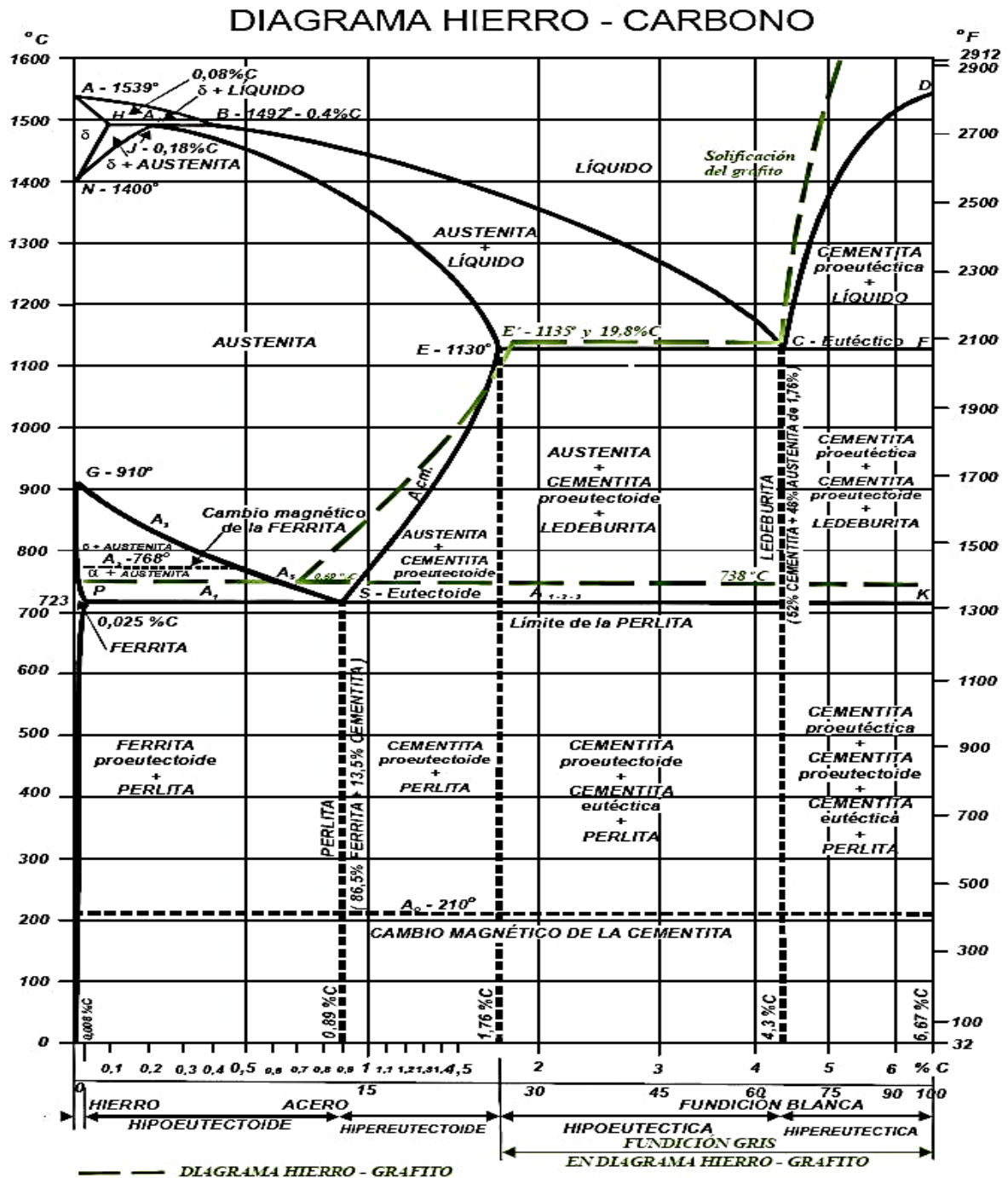


Diagrama 2. Diagrama Hierro-Carbono.
Fuente: (M. montoya, 2013)

4.8. Tratamiento Térmico de Temple

Según la ASM, temple es el enfriamiento rápido del acero desde una temperatura elevada de entre 750°C y 1.300°C, esto se logra sumergiendo la pieza en agua, aceite, sal o ventilación forzada. Con el tratamiento de temple se logra aumentar la dureza, la resistencia mecánica, límite de fluencia, resistencia a la fricción. Disminuyendo la elongación, estricción, flexión, sin embargo, aumentando la fragilidad.

Como resultado del temple, las partes deben desarrollar una microestructura aceptablemente dura generalmente martensita, en el estado templado, y en las áreas críticas unas propiedades mecánicas mínimas. Dependiendo del material base, la temperatura y tiempo de calentamiento, y severidad del enfriamiento se puede conseguir una amplia gama de durezas.

Los factores que se consideran en el temple son:

1. Calentamiento
2. Temperatura de austenización
3. Tiempo de sostenimiento a la temperatura de austenización
4. Medios de enfriamiento. (Pinzón, 2008)

4.8.1 Tipos de temple

Temple ordinario

Es el método más ampliamente usado para tratar el acero. Se realiza calentando el acero hasta una temperatura por encima de AC_3 o Ac_1 y enfriando con una velocidad mayor que la crítica de temple, de modo que se produzca un endurecimiento notable, el cual se debe a la formación de martensita y sucede en la superficie solamente o en toda la pieza, dependiendo de la capacidad de temple del acero y de su espesor. El enfriamiento se hace hasta temperaturas menores a AC_1 y en general por debajo de AC_3 . El temple directo es relativamente simple y económico cuando se aplica a piezas cuyo servicio no es demasiado exigente o a herramientas en las que se busca penetración del temple. No se aplica a piezas de formas complicadas y a materiales sensibles a la distorsión y el agrietamiento debido a lo brusco del enfriamiento. A veces se realiza por enfriamiento desde la temperatura de laminación o de forja inmediatamente después de la deformación en caliente. (Industries, 2015)

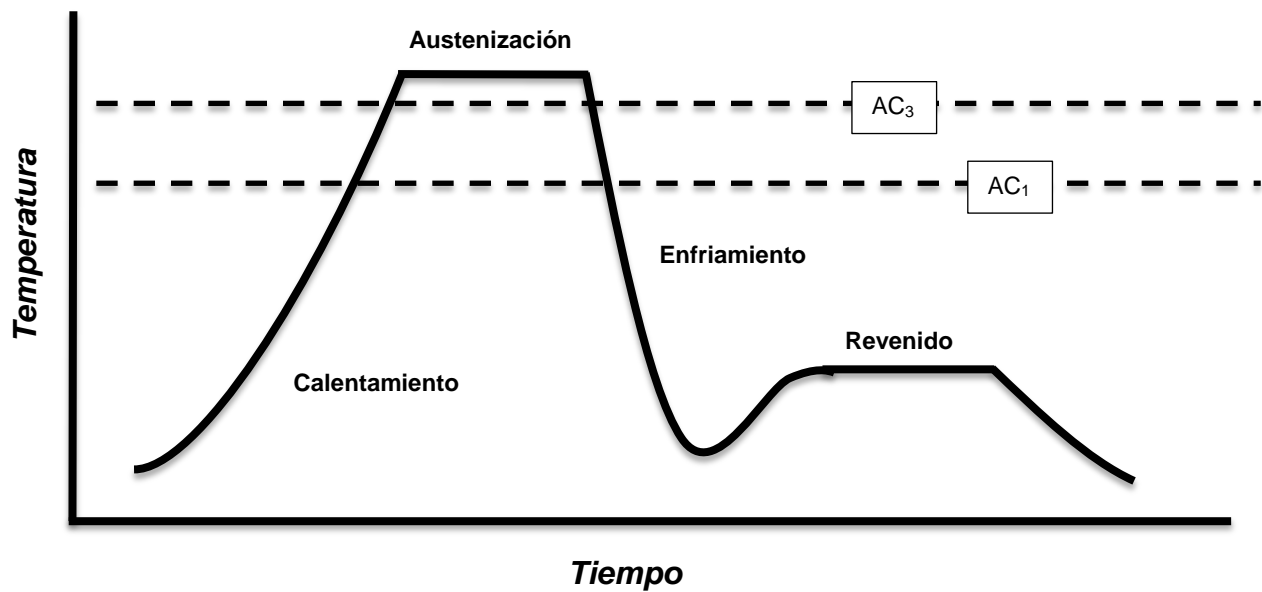


Diagrama 3. Temple y Revenido.
Fuente: (M. montoya, 2013)

Temple Escalonado

Esta forma de temple se usa cuando la velocidad de enfriamiento de la pieza que se temple debe cambiarse abruptamente en un momento dado durante el enfriamiento. Este cambio puede ser un aumento o una disminución de la velocidad de enfriamiento, dependiendo de los resultados deseados. Lo más común es disminuir la velocidad de enfriamiento, esto se hace primero en un medio, por ejemplo, agua, por corto tiempo hasta unos $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, de modo que la pieza esté a una temperatura por debajo de la nariz perlítica de la curva TTT, entonces se retira la pieza y se enfría en un segundo medio, por ejemplo, aceite, de modo que se enfríe más lentamente en el intervalo de transformación martensítica hasta la temperatura ambiente. El segundo medio puede ser aire tranquilo en muchos casos.

A los aceros con más de $0,2\%$ de C, se les puede hacer un temple directamente, en el caso de los aceros con menos de $0,2\%$ de C, para endurecerlos por lo menos superficialmente, se somete a un tratamiento termoquímico (cementación), porque siempre se cortará la nariz perlítica en los diagramas TTT cuando se produzca el enfriamiento.

Existen dos características que se confunde con frecuencia, como son el temple y la dureza, pero su significado es diferente. Cuando se realiza un temple en diferentes tipos de acero, el resultado es que algunos aceros se endurecen más y otros menos. (Pinzón, 2008)

4.9 Tratamiento Térmico de Revenido

4.9.1 Revenido de aceros templados

La estructura martensítica como resultado del temple es muy dura y frágil. Mediante el revenido es posible aumentar significativamente su resistencia al impacto, aun cuando se disminuye la dureza. El revenido consiste en calentar una pieza templada por tiempos de 1 a 3 horas a temperaturas menores que la de austenización, primero se calienta el acero a una temperatura levemente superior a la de austenización, luego es enfriado rápidamente, de modo que no se corte la nariz de las curvas TTT, para formar una estructura martensítica. Posteriormente, el acero es recalentado a una temperatura inferior para obtener la dureza deseada, todo este proceso con la finalidad de optimizar la tenacidad y reducir la fragilidad de las piezas. (Morela, 1991)

Durante el proceso de revenido existen cambios microestructurales o etapas en su estado sólido, Las reacciones más relevantes son la Segregación de átomos de C, Precipitación de carburos, Descomposición de la austenita retenida, Recuperación y recristalización de la matriz ferrítica y formación de cementita globular. (Apraiz, 1997)

5.0. PRUEBA DE DUREZA

Cuando se habla de dureza se define como la mayor o menor resistencia que opone un cuerpo al ser penetrado, se usa tanto en materiales blandos como duros, cambiando entre si los elementos de penetración como bolas de acero o conos de diamante industrial.

Este ensayo radica en aplicar dos cargas una tras de otra designadas como P_0 que es penetración inicial y P_{ad} , penetración admisible, la dureza se basa en el incremento de la penetración de la carga adicional una vez eliminada la misma. (E. Santos, 2001)

De la tabla anterior de escalas de dureza rockwell, las más utilizadas son la B y C, y de estas escalas usaremos rockwell C, porque es usado para determinar la dureza en materiales duros. (Caracterización Mecánica, Metalográfica y Tribológica de un Buje Metálico del Cable Aereo de Manizales, 2016)

Este ensayo se rige bajo las normas. (Colombiana, 2016)

- ISO 1024 = NTC-3996: Norma Técnica Colombiana, Materiales Metálicos, Prueba de dureza, Ensayo Superficial Rockwell.
- IRAM-IAS U 50 -105: Ensayos de dureza Rockwell B y C en acero
- ASTM E18: Ensayo de dureza Rockwell y dureza Rockwell superficial

Escala	Indentador	Carga Total	Color de Escala	Aplicaciones
A	Cono diamante	60	Negro	Metales duros, superficies templadas, chapa fina (0.4mm)
D	Cono diamante	100	Negro	Piezas con superficie templada de dureza media, chapas.
C	Cono diamante	150	Negro	Aceros templados
F	Bola de \varnothing 1/16"	60	Rojo	Aleaciones cobre recocido. Chapa fina metálica (0.6mm)
B	Bola de \varnothing 1/16"	100	Rojo	Aceros blandos, de construcción, metales no ferrosos.
G	Bola de \varnothing 1/16"	150	Rojo	Bronce, cobre-berilio, cobre-níquel, fundición maleable
H	Bola de \varnothing 1/8"	60	Rojo	Aluminio, Zinc, Plomo
E	Bola de \varnothing 1/8"	100	Rojo	Fundición, aleaciones Al-Mg, Metales antifricción o sintéticos
K	Bola de \varnothing 1/8"	150	Rojo	Metales antifricción o de dureza muy baja, Ebonita (ASTM D530-59T), Madera laminada (ASTM D 805-52), Materiales sintéticos (ASTM D-785-60T), Otros materiales muy blandos o muy finos.
L	Bola de \varnothing 1/4"	60	Rojo	
M	Bola de \varnothing 1/4"	100	Rojo	
P	Bola de \varnothing 1/4"	150	Rojo	
R	Bola de \varnothing 1/2"	60	Rojo	
S	Bola de \varnothing 1/2"	100	Rojo	
V	Bola de \varnothing 1/2"	150	Rojo	

Tabla 6 Escalas de dureza Rockwell (Tomado de ASTM E 18 - 03).
Fuente: (A. Corredor, 2016)

6.0 PRUEBA DE ENSAYO CHARPY

Los ensayos dinámicos o de impacto se realizan generalmente con una máquina denominada péndulo Charpy o martillo pendular, ideado por Georges Charpy en el año 1909 en las que se supervisa el comportamiento de los materiales al ser impactados por una masa conocida a la que se deja caer desde una altura determinada. En ambos casos la rotura se produce por flexionamiento de la probeta. (Cona, 2005)

Este dispositivo es utilizado para determinar la tenacidad de un material. Los ensayos de impacto se realizan con una probeta entallada y ensayada a flexión en 3 puntos con dimensiones estrictamente mecanizadas bajo la norma ASTM E 23. El péndulo cae sobre el dorso de la probeta y la parte. La diferencia entre la altura

inicial del péndulo (h) y la final tras el impacto (h') permite medir la energía absorbida en el proceso de fracturar la probeta. En los metales usualmente la fractura es dúctil y ocurre por coalescencia de microcavidades en los cuales la deformación plástica causa nucleaciones de estas cavidades cerca de las inclusiones. (Ingeniería, 2008)

En metales con configuración cristalina BCC, materiales frágiles, la falla ocurre cuando existe una división en el plano $\{001\}$ debido a un esfuerzo de tensión crítico. Como el esfuerzo de tensión en la zona plástica puede ser lo suficientemente alto para que la división ocurra, el mecanismo de fractura en un metal cambia y en ocasiones dependerá de la tasa de deformación y en otras ocasiones debido al decremento de la temperatura. (G. Gonzales, 2006)

La prueba de impacto Charpy es empleada para determinar el comportamiento de la transición de dúctil a frágil de un material, es muy importante para definir la transición en términos de energía de fractura. Una fractura frágil es una fractura de baja energía y una fractura dúctil es una fractura de alta energía. (G. Gonzales, 2006)

La siguiente grafica se aprecia el comportamiento de la tenacidad de dos tipos de materiales con respecto a la variación de la temperatura, donde se compara el Aluminio un material blando con respecto a un Acero al Carbono un material más duro, que al momento de ser calentado, la tenacidad del Acero al Carbono cambia significativamente comparado con la tenacidad del Aluminio.

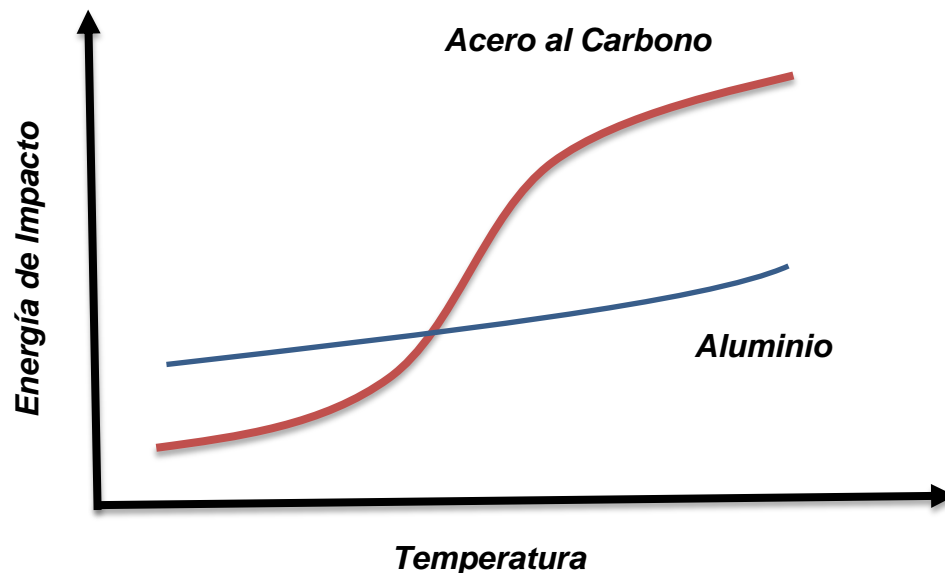


Diagrama 4. Temperatura vs. Energía de impacto.
Fuente: (M. Caldera, 2004)

7.0 METALOGRAFÍA.

La metalografía se basa en la observación de granos, tamaño, dirección y la composición de los mismos; estas microestructuras pueden ser observadas en un

rango entre 10^{-8}m y 10^{-2}m , con el fin de determinar si dicho material cumple con los requisitos por el cual fue diseñado, en donde se puede visualizar si el material tuvo presencia de materiales fundidos, laminados, forjados y sus fases que componen las aleaciones e inclusiones. (Internacional, 2004)

8.0 TÉCNICAS DE MICROSCOPIA

8.1. Técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

Por sus siglas en inglés (scanning electron microscopy), Se basa en una observación y caracterización de materiales nanométrica y microscópicamente, para obtener imágenes topográficas de alta calidad. Es un instrumento capaz de ofrecer un variado rango de informaciones procedentes de la superficie de la muestra. Su funcionamiento se basa en barrer un haz de electrones sobre un área del tamaño que deseemos aumentar mientras en un monitor se visualiza la información que hayamos seleccionado en función de los detectores que haya disponibles. (V. Morales, 2014)

Existen varios tipos de técnica (SEM) como:

Detector de electrones secundarios (SE).

Detector de electrones retrodispersados (BSE).

Detector de rayos X (WDS).

Detector de electrones retrodispersados difractados (BSED).

Detector de rayos X (EDS): es el que recibe los rayos X procedentes de cada uno de los puntos de la superficie sobre los que pasa el haz de electrones. Como la energía de cada rayo X es característica de cada elemento, podemos obtener información analítica cualitativa y cuantitativa de áreas del tamaño que deseemos de la superficie. Por ello se conoce esta técnica como Microanálisis por EDS. El cual fue usado en nuestra investigación. (Investigación, 2012)

8.2. Técnica de difracción de Rayos X (DRX).

En la actualidad es la técnica más poderosa para estudiar el tamaño del grano de los materiales y puede proporcionar detalles estructurales de este.

La difracción es una característica de las ondas, en otras palabras, es la dispersión de las ondas cuando interactúan con un objeto ordenado. Estas se dan en toda clase de ondas, desde las sonoras, hasta los rayos X. (I. Gómez, 2017)

En el año 1912 se descubrió de manera exacta la naturaleza de los rayos X y la difracción de rayos x en cristales, este descubrimiento probó la naturaleza de los rayos X y proporcionó un nuevo método de investigación en la estructura de la materia.

Los rayos X son radiación electromagnética de la misma naturaleza que la luz, pero de longitud de onda mucho más corta. Las unidades de medida son los angstroms (Å), equivalente a 10^{-10} m y los rayos x usados en difracción tienen longitudes de onda en el rango 0.5-2.5 Å mientras que la longitud de onda de la luz visible está en el orden de 6000 Å.

Los rayos X son difractados por los electrones que rodean los átomos ya que su longitud de onda es del mismo orden de magnitud que el radio atómico. El haz de rayos X emergente después de la interacción, tiene información sobre la posición y tipo de átomos encontrados en el transcurso de su recorrido. Los cristales, al contener estructura periódica, dispersan elásticamente los haces de rayos X en algunas direcciones y posteriormente amplifican por interferencia constructiva, plasmando un patrón de difracción, hay varios tipos de detectores especiales para observar y medir la intensidad y la posición de los rayos X difractados y en el análisis posterior con ayudas matemáticas se logra obtener una representación a escala atómica de los átomos y moléculas del material estudiado. (Sanz, 1995)

9.0 ACERO ALPHA

Para analizar los resultados y llegar a una conclusión en nuestra investigación debemos tener en claro algunos conceptos.

El acero es una aleación de hierro con una pequeña proporción de carbono, que comunica propiedades especiales tales como dureza y elasticidad. En general, también se pueden fabricar aceros con otros componentes como manganeso, níquel o cromo. El hierro es un constituyente fundamental de algunas de las más importantes aleaciones de la ingeniería. El hierro es un metal alotrópico, (es la propiedad de algunas sustancias simples de poseer estructuras moleculares diferentes.) por lo que puede existir en más de una estructura reticular dependiendo fundamentalmente de la temperatura. Es uno de los metales más útiles debido a su gran abundancia en la corteza terrestre (constituyendo más del 5% de esta, aunque rara vez se encuentra en estado puro, lo más normal es hallarlo combinado con otros elementos en forma de óxidos, carbonatos o sulfuros) y a que se obtiene con gran facilidad y con una gran pureza comercial. Posee propiedades físicas y mecánicas muy apreciadas y de la más amplia variedad.

El hierro técnicamente puro, es decir, con menos de 0.008% de carbono, es un metal blanco azulado, dúctil y maleable, cuyo peso específico es 7.87. Funde de

1536.5°C a 1539°C reblandeciéndose antes de llegar a esta temperatura, lo que permite forjarlo y moldearlo con facilidad.

Pero en este documento nos referiremos al acero como acero alpha, pues es el nombre del elemento que nos referencia fácilmente con los resultados obtenidos en los laboratorios. Cuando se habla de acero alfa quiere decir que el acero cristaliza hasta la temperatura de 768°C. La red espacial a la que pertenece es la red cúbica centrada en el cuerpo (BCC). La distancia entre átomos es de 2.86 Å. El hierro alfa no disuelve prácticamente en carbono, no llegando al 0.008% a temperatura ambiente, teniendo como punto de máxima solubilidad a $T=723^{\circ}\text{C}$ (0,02%).

No podemos dejar de mencionar los constituyentes del acero, pues son elementos que siempre estarán, dependiendo el tratamiento térmico al que sea sometido el material. (M. montoya, 2013)

10. CONSTITUYENTES DEL ACERO.

Algunos de los constituyentes del acero se podrán ver durante el proceso de revenido a diferentes temperaturas. (William, 1993)

FERRITA:

Se considera como hierro alfa puro porque su solubilidad en temperatura ambiente es tan baja que no llega a disolver ni en 0.008% de C. La ferrita es el más blando y dúctil constituyente de los aceros que cristaliza en una estructura BCC.

CEMENTITA:

Es carburo de hierro CFe_3 y por tanto su composición es de 6.67% de C y 93.33% de Fe en peso. Es un constituyente muy resistente y duro pero el más frágil de los aceros, alcanzando una dureza de 960 Vickers. Cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico de gran tamaño.

PERLITA:

Son laminas alternadas de ferrita y cementita compuesta por el 86.5% de ferrita y el 13.5% de cementita, es decir, hay 6.4 partes de ferrita y 1 de cementita. La perlita tiene una dureza de aproximadamente 200 Vickers, con una resistencia a la rotura de 80 Kg/mm^2 y un alargamiento del 15%. Esta estructura laminar se observa en la perlita formada por enfriamiento muy lento. Si el enfriamiento es muy brusco, la estructura es más borrosa y se denomina perlita sorbitica.

AUSTENITA:

Este es el constituyente más denso de los aceros, y está formado por la disolución sólida, por inserción, de carbono en hierro gamma. La proporción de C disuelto varía desde el 0 al 1.76%. La austenita tiene una dureza de 305 Vickers, una resistencia de 100 Kg/mm^2 y un alargamiento de un 30 %. No presenta propiedades magnéticas.

MARTENSITA:

Después de la cementita es el constituyente más duro de los aceros. La martensita se presenta en forma de agujas y cristaliza en la red tetragonal. La proporción de carbono en la martensita no es constante, sino que varía hasta un máximo de 0.89% aumentando su dureza, resistencia mecánica y fragilidad con el contenido de carbono. Su dureza está en torno a 540 Vickers, y su resistencia mecánica varía de 175 a 250 Kg/mm² y su alargamiento es del orden del 2.5 al 0.5%. Además, es magnética.

BAINITA:

Se forma la bainita en la transformación isoterma de la austenita, en un rango de temperaturas de 250 a 550°C. El proceso consiste en enfriar rápidamente la austenita hasta una temperatura constante, manteniéndose dicha temperatura hasta la transformación total de la austenita en bainita.

LEDEBURITA:

La ledeburita no es un constituyente de los aceros, sino de las fundiciones. Se encuentra en las aleaciones Fe-C cuando el porcentaje de carbono en hierro aleado es superior al 25%, es decir, un contenido total de 1.76% de carbono. Ella se forma al enfriar una fundición líquida de carbono (de composición alrededor del 4.3% de C) desde 1130°C, siendo estable hasta 723°C, descomponiéndose a partir de esta temperatura en ferrita y cementita

El constituyente principal del cual vamos a analizar en esta investigación es la martensita por ser el elemento principal obtenido en los resultados de laboratorio.

11. EQUIPOS DE LABORATORIO

11.1. Equipos de la Universidad Libre.

Horno de Tratamiento térmico:

El equipo utilizado para el tratamiento térmico del acero SAE 5160, fue un horno de mufla tipo M-10, marca "ELEKTRO", termocupla tipo K, con área de trabajo de 2.25 mtrs² y con una temperatura máxima de 1250°C.

Péndulo de ensayo destructivo Charpy

El equipo usado para el ensayo destructivo Charpy, fue el péndulo de impacto marca "SATEC", System Inc.

Equipo de Prueba de Dureza

En el equipo en el que se ejecutó La prueba de dureza es de marca "INNOVATEST", situado en los laboratorios de tratamientos térmicos de la universidad libre de Colombia sede Bosque popular.

Microscopio Metalográfico

El microscopio empleado en el análisis metalográfico del material tratado térmicamente, fue el “OLYMPUS PM3 PMEÜ”, ubicado en el laboratorio mencionado anteriormente.

Equipo de Pulido

Equipo de paños, marca Metkon FORCIPOL 1V, GRINDER – POLISHER; ubicado en el laboratorio de Tratamientos Térmicos de la universidad Libre de Colombia

Equipo de SEM “Microscopio Electrónico de Barrido”

El microscopio empleado para el análisis electrónico de barrido fue el Tescan Vega 3 SB, que opera con un filamento de tungsteno a voltajes de aceleración de los electrones desde 200V hasta 30kV y vacíos de 0,009 Pa a 2000 Pa (pascal). El microscopio posee actualmente tres detectores: electrones secundarios (SE), electrones retrodispersados (BSE) para observación de imágenes y de espectroscopía de rayos X por energía dispersiva (EDX) y que para análisis elementales, logra una resolución en la imagen de 3 nm.

Equipo de DRX “Difracción de Rayos X”

Las muestras de acero fueron medidas en el difractómetro XPert – PRO de la casa PanAlytica, implementado con tubo de ánodo de cobre, con potencia de trabajo de 1800 watts, rendija divergente de 0.5°. Las medidas se realizaron con un barrido de 10 a 90° 2 θ a un paso de 3° 2 θ . Los análisis de los datos de difracción se realizaron con ayuda del software Xpert.Plus y XPowder.

12. ESTADO DEL ARTE

Se ha demostrado en anteriores estudios y en tesis de pregrado con título de EFECTO DE LA TEMPERATURA DE REVENIDO EN EL ACERO SAE 5160 EN LA RESISTENCIA AL IMPACTO, de la universidad INCCA de Colombia, dirigido por el ingeniero Mecánico Mauricio Sierra, que el acero 5160 después de hacerle tratamientos térmicos de temple y revenido a ciertas temperaturas se encuentra que en un rango del tratamiento el material se fragiliza, perdiendo sus propiedades mecánicas que lo caracterizan. (F. Ballen, 2010)

Algunas de los trabajos que se han realizado como en la Universidad Nacional de Colombia seccional Medellín en la cual investigaron la INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS CARBUROS Y LOS PRECIPITADOS DE BORDE DE GRANO EN EL ACERO 5160H. Concluyeron que Las mejores propiedades mecánicas se obtuvieron en la aleación que tiene bajo contenido de elementos microaleantes combinado con la mayor temperatura

de austenización de 1000°C y el mayor tiempo de sostenimiento de 30 minutos durante el proceso de temple. Esto con uso de diferentes técnicas de visualización microestructural como ejemplo técnicas (SEM) y (TEM) y de análisis químico (OES). (Perez, 2012)

En la Universidad del Cauca se hizo una investigación sobre EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LOS ACEROS SAE 5160, 4140 Y S600 CON RECUBRIMIENTOS MULTICAPAS DE Ti/TiN PREPARADAS CON MAGNETRON SPUTTERING (PULVERIZACION CATODICA). Donde se estableció un incremento de la dureza y la adherencia con el aumento del número de bicapas depositadas con el fin de obtener el mejor comportamiento para los recubrimientos multicapas depositados sobre el acero AISI 5160. (F. Correa, 2007).

En el año 2011 el estudiante de ingeniería Mecánica Edgar Espejo de la Universidad Nacional de Bogotá Colombia, hizo un estudio sobre la CARACTERIZACION DE LA TENACIDAD DE FRACTURA BAJO LA NORMA ASTM E 399-08 (PROBETA SENB), EN ACEROS AISI-SAE 5160H, UTILIZADO EN FABRICACION DE BALLESTAS. Se determinó que la temperatura de templado influyo en la tenacidad de la fractura, evidenciando que una de las probetas tenia mayor Resistencia que las demás. (J. Martinez, 2011)

En el 2004 en la revista de la Universidad Nacional se plasmó un estudio sobre EL MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE GRANALLADO PARA RESORTES DE BALLESTA UTILIZANDO MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES POR DIFRACCION DE RAYOS X EN ACERO SAE 5160H, donde se encontró que los perfiles de esfuerzos residuales generados bajo las condiciones analizadas en dicha tesis, fueron relativamente profundos, lo cual es benéfico para detener grietas superficiales que están en etapa de crecimiento, y de que en caso se quiera disminuir la diferencia entre los valores de los esfuerzos superficiales y máximo se tiene la posibilidad de realizar variaciones del tamaño y velocidad de la granalla. (H. hernandez, 2004)

El departamento de Ingeniería mecánica y Mecatrónica, de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, en el año 2013, hicieron una importante investigación sobre; INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DEL TRATAMIENTO TÉRMICO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO 5160H, donde se arrojó importantes resultados de investigación, dando como conclusión, que después de someter el material a temple, presentó una microestructura de martensita y austenita retenida con un rango de dureza entre 49-66 HRC, pero de acuerdo a los términos de dureza para este tipo de acero el rango es de 58-63 HRC, y se observa que varios de los datos tomados no se encuentran dentro de los rangos establecidos. Con respecto a la tenacidad el efecto de la temperatura de austenización los valores obtenidos son bajos pues las probetas continúan presentando un alto grado de fragilidad. y en el ensayo de tensión, las probetas templadas no presentaron deformación plástica ni estricción, osea que la ruptura de la probeta se obtuvo sin mostrar deformación de cuello. (W. Perez, 2013)

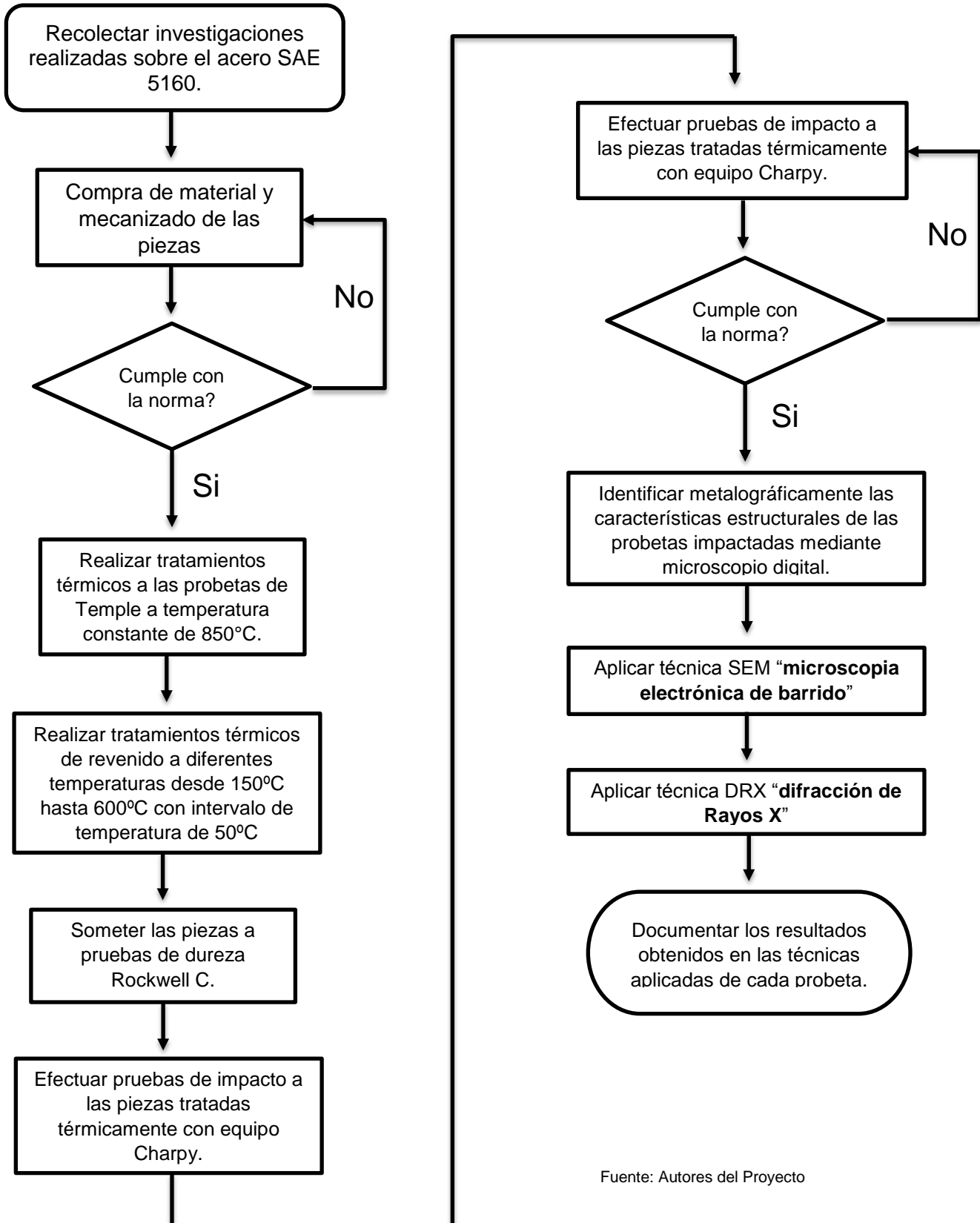
La Escuela de Ingeniería de São Carlos en conjunto con la Universidad de Sao Paulo hicieron una investigación sobre la INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE FÓSFORO Y DE ENFRIAMIENTO / TEMPERATURAS DE REVENIDO EN

TENACIDAD A LA FRACTURA Y RESISTENCIA A LA FATIGA DE ACERO SAE 5160, en esta investigación el acero a analizar tiene cuatro contenidos diferentes de fósforo (P), que varía de 0.012 a 0.030%, fue sometido a ensayos mecánicos Como dureza, resistencia al impacto y pruebas de fatiga antes de ser sometido a tratamientos térmicos de temple en aceite mineral a 66°C, para conocer sus propiedades iniciales. Las conclusiones encontradas fueron qué. el contenido de fosforo (P) tiene un fuerte dominio en las propiedades al impacto del acero, en la parte fractográfica el contenido de (P) se relacionó con mayor porcentaje de fractura intergranular, siendo nocivo y perjudicial para dicho material y se recomienda que el contenido de fosforo (P) de aceros para muelles sea de 0.01%. (D. Borges, 2010)

En la Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey México DC. En el año 2015, Se realizó una tesis de grado sobre, TEMPLE INTENSIVO DE UN ACERO AISI/SAE 5160, donde mediante tratamiento aplicado al material se obtuvo una microestructura tipo coraza-núcleo con altos esfuerzo residual en la superficie, algunas ventajas de dicho temple fueron. dureza alta en materiales de baja aleación y bajo carbono, Obtención de durezas más profundos, en relación a otros métodos, Eliminación de carburizado en piezas que requieren alta dureza en superficie, Reducción de distorsión por el temple y Generación de esfuerzos residuales compresivos en superficie sin operaciones secundarias. (G. Martinez, 2015)

Las normas que rigen este proyecto son ASTM E23: standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials, NORMA NTC COLOMBIANA 3353 SIDERURGIA. Definiciones y métodos para los ensayos mecánicos de productos de acero, NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 20-1 ACERO. Ensayo de impacto charpy (entalla en v).

13. DISEÑO METODOLÓGICO



Fuente: Autores del Proyecto

14. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo permite realizar el análisis del efecto de la temperatura de revenido en el acero SAE 5160, la teoría previamente expuesta supone que este acero es susceptible a la fragilidad de revenido, pero en este caso se evaluarán por medio de inspección visual, pruebas de dureza, análisis metalográfico y técnicas SEM y DRX para tratar de verificar que en efecto lo que la teoría expone se puede validar. La correlación de los resultados por medio de estas técnicas de caracterización permitirá emitir unos conceptos más claros a la luz de cumplir a satisfacción con los objetivos propuestos para este proyecto.

14.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el debido desarrollo y cumplimiento del proyecto es necesario la implementación de un modelo experimental, para determinar la cantidad de material requerido para realizar el mecanizado de las probetas con el objetivo de:

- Aumentar la eficacia, confiabilidad y veracidad del experimento
- Determinar el número de datos exactos del estudio.
- Proveer un estimado del error experimental, tal estimación se convierte en la unidad básica para determina, si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente significativas.

Se seleccionó un diseño experimental de un factor, el factor seleccionado es la temperatura la cual se realizará el revenido con respecto a los resultados de pruebas de durezas. El programa usado para tal fin fue MiniTab 17. Anova.

Se deben tener presentes las siguientes variables.

Los datos son balanceados: si son balanceados

Tipo de Diseño: 10^1

Modelo Matemático: $y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$

Hipótesis Nula (Ho): No existe efecto significativo de las pruebas de dureza sobre temperatura de revenido.

Hipótesis Alterna (Ha): existe efecto significativo de las pruebas de dureza sobre temperatura de revenido.

Nivel de significancia empleado: $\alpha = 0,05$

Regla de decisión: si $P < \alpha$ la H_0 se rechaza

Toma de decisión: $P = 0,000$

Como $P < \alpha$ la H_0 se rechaza

Conclusión:

Existe efecto significativo de las pruebas de dureza sobre temperatura de revenido.

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Temperatura	10	150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 550; 600

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura	9	1977,50	219,722	1647,92	0,000
Error	20	2,67	0,133		
Total	29	1980,17			

Resumen del modelo

S	R-cuad.
0,365148	99,87%

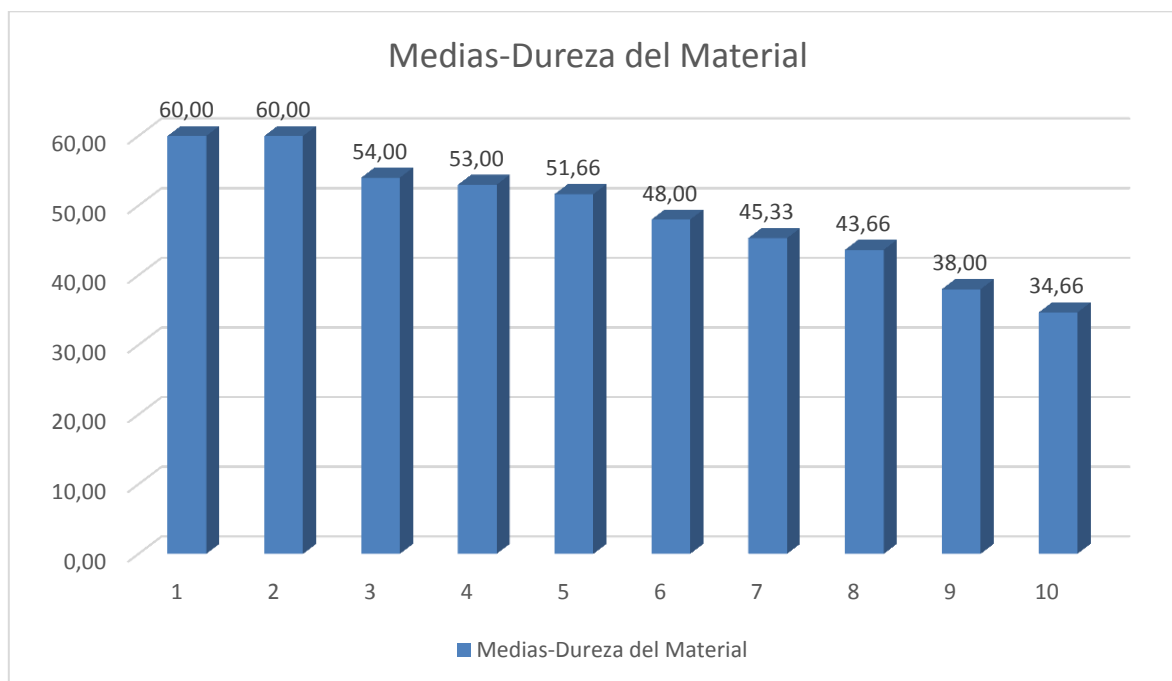
Error de Estimación:

$S = 0,365148$

Coefficiente de Determinación:

R-cuad. = 99,87% el 99% de los valores de dureza de las probetas se explican con la temperatura de revenido.

Grafica de las Medias:



Gráfica 1 Autores del proyecto.

Como se muestra en la gráfica anterior, el comportamiento de la media de dureza de las probetas tratadas térmicamente, por medio de revenido, muestran una caída constante, en donde la probeta No. 1 tiene una dureza media de 60 HRc. y la probeta No. 10 tiene una dureza media de 34,66 HRc.

Agrupar con el Método de Fisher:

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

Temperatura	N	Media	Agrupación
200 °C.	3	60,00	A
150 °C.	3	60,00	A
250 °C.	3	54,00	B
300 °C.	3	53,00	C
350 °C.	3	51,667	D
400 °C.	3	48,00	E
450 °C.	3	45,333	F
500 °C.	3	43,667	G
550 °C.	3	38,00	H
600 °C.	3	34,667	I

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Analizando los datos anteriores y entendiendo que las medias que no comparten una letra, son significativamente diferentes. Se corrobora con los primeros datos de temperatura a 150°C y 200°C, donde la letra **A** coincide en los resultados de dureza, y las demás temperaturas no coinciden entre ellas.

De donde se infiere que se debe realizar 2,67 aproximando a 3 repeticiones de los ensayos realizados, por cada temperatura de revenido para dar una confiabilidad del 99,87%, con una probabilidad de rechazar la hipótesis del $\alpha = 0,05$.

En total serian 30 repeticiones para relacionarlas con las temperaturas de revenido propuestas a analizar. Entendiendo los costos de los servicios de laboratorios de las técnicas SEM y DRX aplicadas, en esta investigación y considerando el factor económico, no fue posible someter las 30 piezas del resultado del diseño experimental. Se llegó a la conclusión que se podría aplicar a una (1) probeta por temperatura y así nos daría un margen amplio de resultados como los obtenidos al final del documento.

14.2. TABLA DE COMPARACIÓN DE DUREZA-TENACIDAD

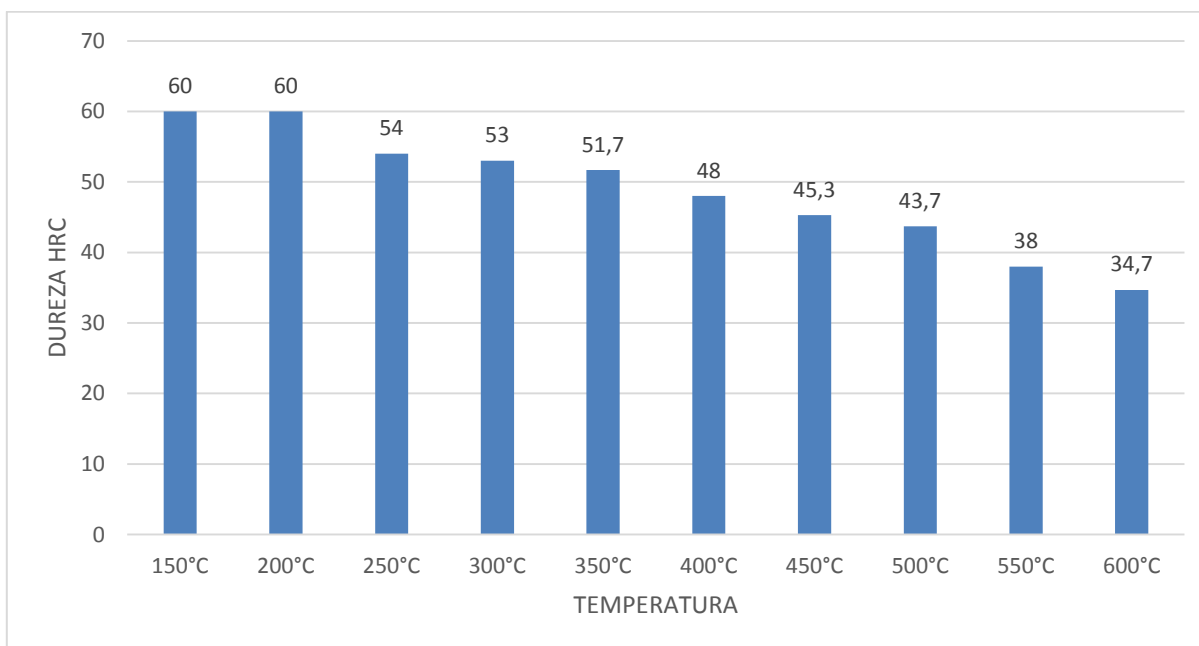
Prueba de Dureza HRC y Ensayo Destructivo (Charpy)

TEMPERATURA DE REVENIDO [°C]	ROTULADO DE MUESTRA	DUREZA HRC PROBETAS			PROMEDIO DUREZA	ENERGÍA DE IMPACTO (JOULES)
		1	2	3		
SIN TRATAMIENTO TERMICO	A2					7,5 J
150°C	2	60	60	60	60	2,5 J
200°C	5	60	60	60	60	2,5 J
250°C	10	54	54	54	54	2,25 J
300°C	13	53	53	53	53	2,25 J
350°C	17	52	51	52	51,7	2,25 J
400°C	21	48	48	48	48	4,75 J
450°C	26	45	45	46	45,3	9 J
500°C	31	44	44	43	43,7	20 J
550°C	34	38	38	38	38	27,5 J
600°C	38	34	35	35	34,7	52,5 J

Tabla 7 Resultados de Pruebas de Dureza HRC.
Fuente. Autores del proyecto

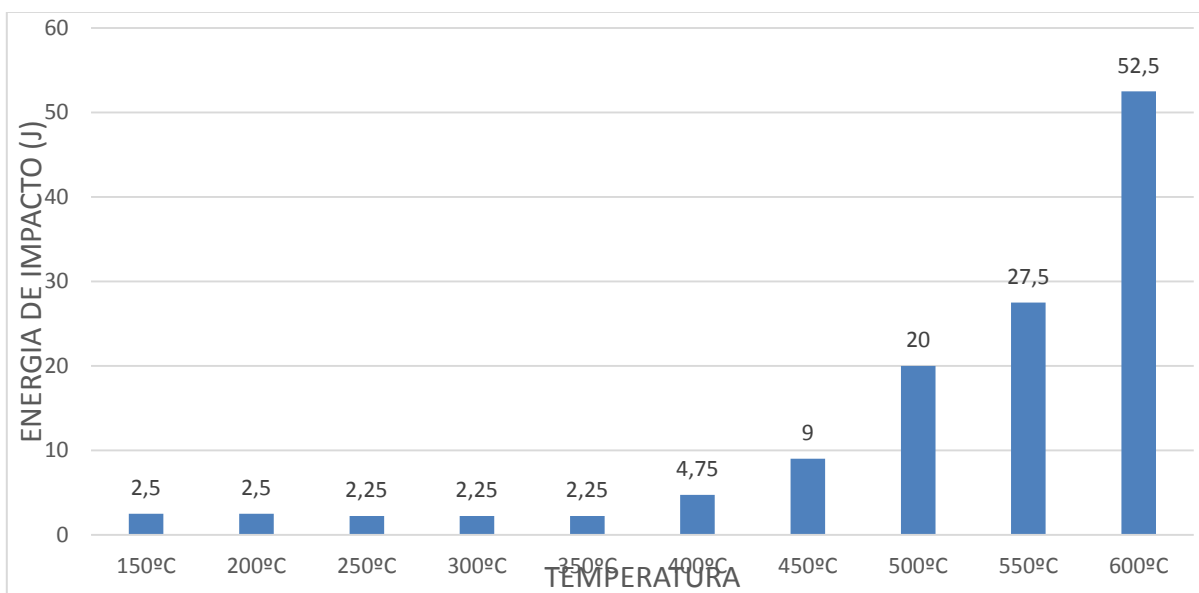
En la tabla No.7 se hace la comparación de las pruebas de dureza y ensayos destructivos a la que cada probeta fue sometida.

14.3. GRAFICA TEMPERATURA DE REVENIDO VS DUREZA HRC



Gráfica 2. Temperatura de Revenido vs Dureza.
Fuente. Autores del Proyecto

14.4. GRAFICA TEMPERATURA DE REVENIDO VS TENACIDAD



Gráfica 3. Temperatura de Revenido vs Energía de impacto.
Fuente. Autores del Proyecto

15. ANÁLISIS Y PRUEBAS DE RESULTADOS

15.1. Inspección Visual del Ensayo Destructivo Charpy

15.1.1. Probeta sin Tratamiento Térmico



Imagen 1. Probeta sin tratamiento térmico.

En la imagen 1 se muestra la probeta sin tratamiento térmico del acero SAE 5160, la cual fue sometida a impacto por un martillo para pruebas tipo Charpy, donde podemos notar que tuvo una deformación extremadamente rápida, la cual se puede categorizar como una fractura frágil.

15.1.2. Probeta a 150°



Imagen 2. Probetas a 150°C de Revenido.

En la 2da imagen. La probeta fue sometida a un revenido de 150°C, donde podemos ver, que no hay una diferencia significativa en el tipo de fractura.

15.1.3. Probeta a 200°

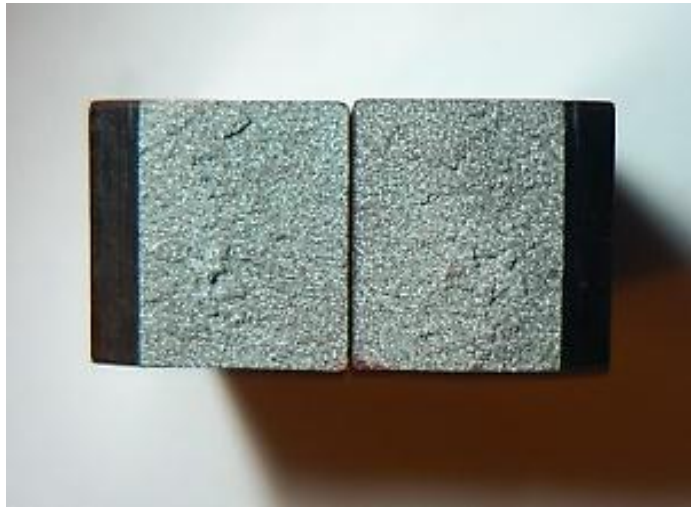


Imagen 3. Probetas a 200°C de Revenido.

En la probeta sometida a 200°C de revenido, se empieza a ver algunas pequeñas zonas de deformación, pero sigue teniendo una fractura típica de un material frágil

15.1.4. Probeta a 250°

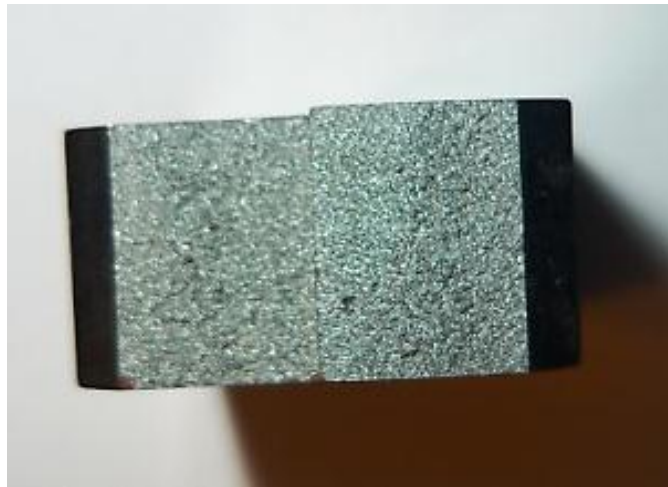


Imagen 4. Probetas a 250°C de Revenido.

En la imagen 4. Se ven unas franjas centrales donde se podría decir que el material como se encuentra aún en bajas temperaturas su fractura es de modo frágil, lo que quiere decir que su energía absorbida por el impacto es pequeña.

15.1.5. Probeta a 300°

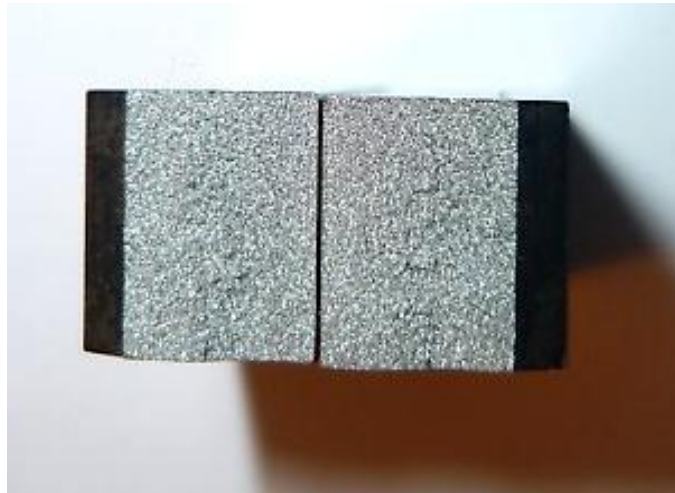


Imagen 5. Probetas a 300°C de Revenido.

En la imagen 5. Ya se empieza a notar aún más, algunos picos pequeños en las franjas centrales, donde se podría interpretar como zonas de transición de frágil a dúctil.

15.1.6. Probeta a 350°



Imagen 6. Probetas a 350°C de Revenido.

De esta imagen a la imagen anterior, se podría decir que no hay mucha diferencia, aun se notan los picos pequeños o la concentración de zonas de transición y algo de óxido por manipulación en la parte inferior derecha, donde se puede identificar como una zona rojiza.

15.1.7. Probeta a 400°



Imagen 7. Probetas a 400°C de Revenido.

En la probeta sometida a 400°C de revenido, ya es evidente la zona de transición o salto brusco, donde su parte central se caracteriza por una fractura sobresaliente, dando lugar al tipo de fractura dúctil.

15.1.8. Probeta a 450°



Imagen 8. Probetas a 450°C de Revenido.

En estos términos del laboratorio destructivo, en el cual se han sometido varias probetas a un temple de 890°C y a diferentes temperaturas de revenido, podemos notar en la imagen anterior, la cual fue sometida a revenido de 450°C, que la fractura traspaso la zona de transición de frágil a dúctil.

15.1.9. Probeta a 500°

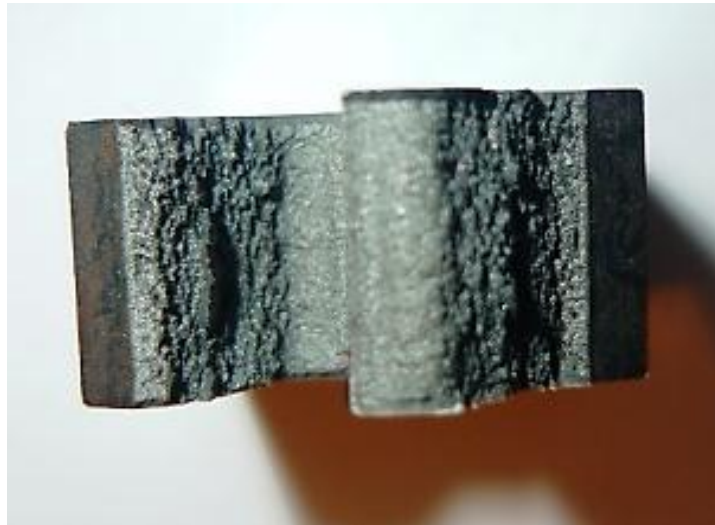


Imagen 9. Probetas a 500°C de Revenido

En la probeta 9 sometida a 500°C de revenido, ya se puede ver notablemente la fase dúctil en la que se encuentra el material. Eso quiere decir que el material absorbió alta cantidad de energía antes de la rotura.

15.1.10. Probeta a 550°



Imagen 10. Probeta a 550°C de Revenido.

La misma situación se vive con la probeta con revenido a 550°C, donde la deformación de la fractura se podría decir que está de forma plástica.

15.1.11. Probeta a 600°



Imagen 11. Probeta a 600°C de Revenido.

La probeta de laboratorio sometida a 600°C de revenido, la deformación de la fractura después del ensayo destructivo “Charpy” es totalmente dúctil y con una deformación plástica notable sobre la pieza.

15.2. Caracterización Microestructural

Desde el punto de vista microestructural se va a realizar un análisis de la microestructura del acero a cada una de las temperaturas propuestas, el reactivo utilizado para llevar a cabo este procedimiento es Nital al 3%, este procedimiento se llevó a cabo en un microscopio óptico metalográfico marca Olympus ubicado en el laboratorio de metalografía de la Universidad Libre.

La micrografía que se muestra a continuación es la obtenida del material en estado de entrega, es decir en las condiciones que el proveedor suministra el material, esta condición es importante debido a que a partir del estado inicial se evalúa la evolución de la estructura en el material.

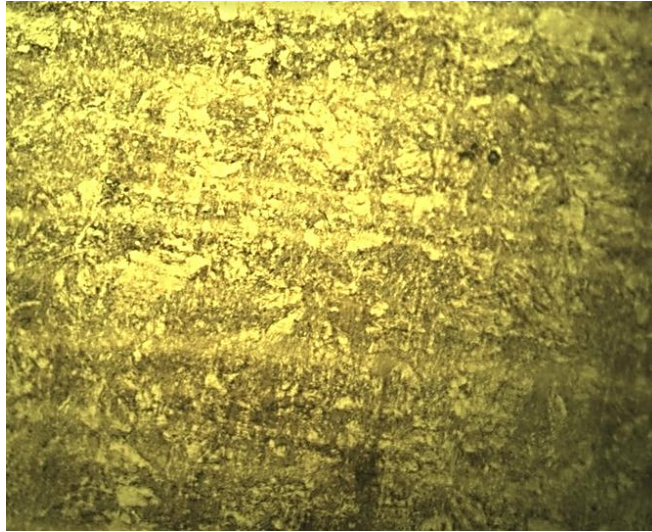


Imagen 12. Microestructura estado de entrega acero 5160. 500X.

Se trata de una metalografía en la que se puede apreciar que el material en estado de entrega está en condición de bonificado, es normal que este tipo de aceros se presente esta condición debido a que después del procesamiento de obtención se realiza un tratamiento térmico de temple y revenido (Bonificado) para entregar el material a un valor de dureza predeterminado, las zonas oscuras corresponden a la perlita del material, con presencia de algunas islas de ferrita y el bandeado de la perlita característico de un material procesado por laminación.

El tratamiento térmico realizado consistió en un temple a 890°C con enfriamiento en aceite y revenido a diversas temperaturas desde 150°C a 600°C en intervalos de 50°C para poder así tener un campo de análisis con suficientes argumentos para poder determinar si en efecto, como la teoría lo dice, este material es susceptible a la fragilidad de revenido.

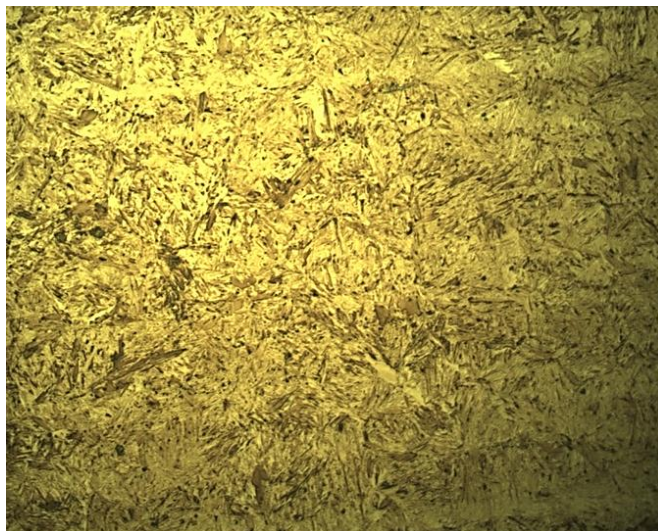


Imagen 13. Microestructura acero 5160 revenido a 150°C. 500X.

La imagen 13. Muestra la micrografía del acero revenido a 150°C, es evidente la presencia de martensita, entre otras, porque esta serie de aceros se caracteriza por tener una muy buena templabilidad, a esta temperatura de revenido es notorio que la martensita no ha sufrido una transformación notoria.

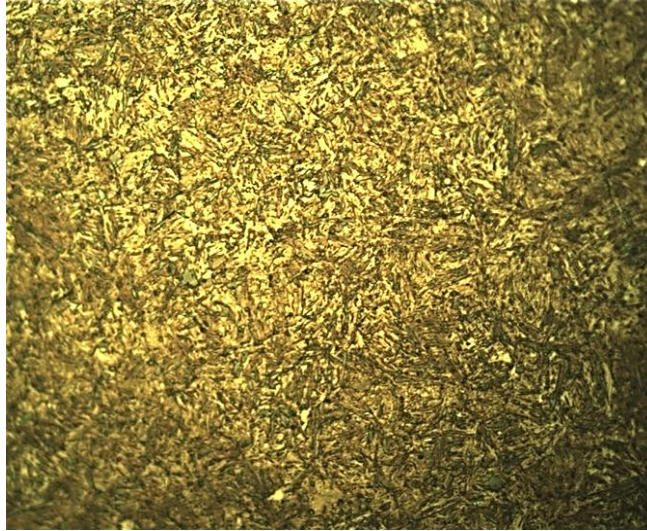


Imagen 14. Microestructura acero 5160 revenido a 200°C. 500X.

A 200°C de temperatura de revenido ya empieza a verse una evolución en la transformación de la martensita, se puede evidenciar un reordenamiento de las placas con una tendencia a “globulizarse”, es decir, a que el aspecto de agujas de la martensita empiece a cambiar y deje ver la forma circular producto del tratamiento, esto se puede observar en la imagen 14., donde la morfología cambia ligeramente en algunas regiones.

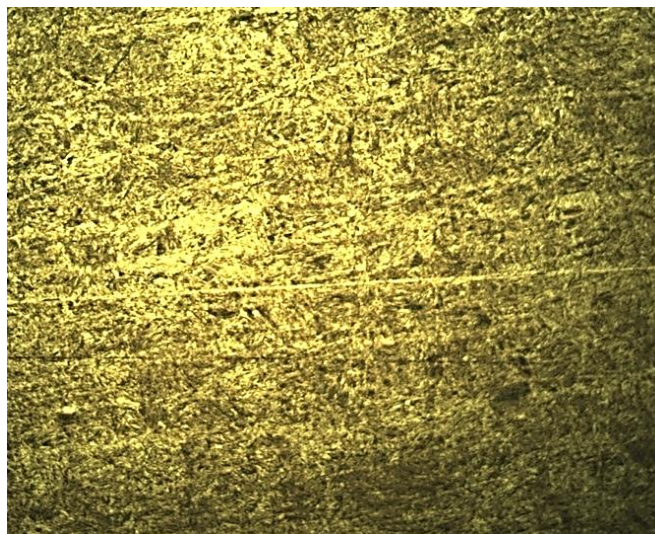


Imagen 15. Microestructura acero 5160 revenido a 250°C. 500X.

En el acero revenido a 250°C se aprecia una variación en la forma de la martensita y la aparición de bandeado, esto es probable que se deba a la dirección en la cual fue tomada la micrografía, es evidente que empiezan a aparecer zonas en las cuales hay más presencia de ferrita, lo cual podría llevar a afirmar que el tratamiento térmico se realizó de manera correcta, esta aparición de zonas claras se puede notar en la figura 7.

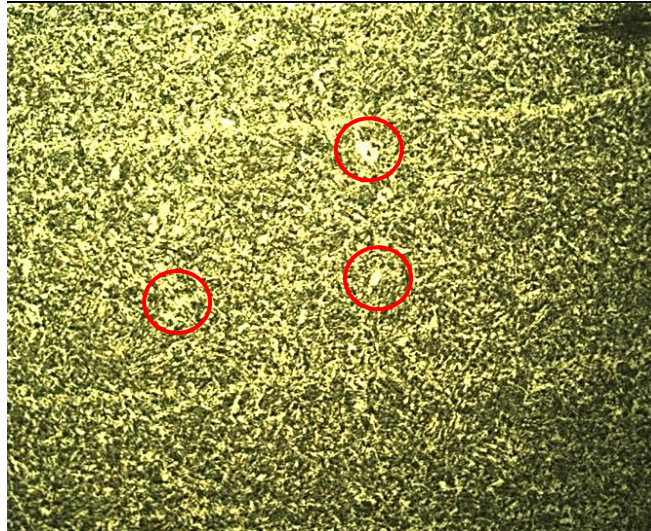


Imagen 16. Microestructura acero 5160 revenido a 300°C. 500X.

La aparición de lo que aparentemente se trata de carburos épsilon se empieza a observar en la micrografía de la imagen 16, se puede notar la aparición de precipitados de color blanco bien definidos, encerrados en los círculos en la figura, no es atípica esta presencia pues en este tipo de aceros, con relativamente altos contenidos de cromo es común este fenómeno.

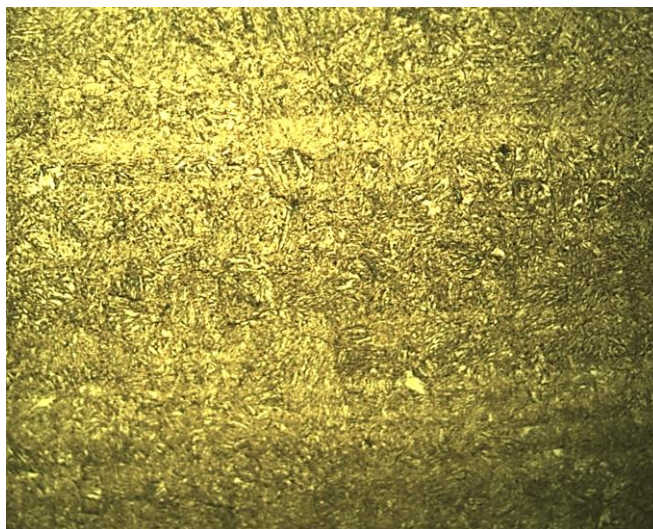


Imagen 17. Microestructura acero 5160 revenido a 350°C. 500X.

A 350°C se nota el incremento en el grado de refinamiento de la martensita, la imagen 17. Muestra la evolución que va sufriendo la microestructura a medida que aumenta la temperatura, también se nota, de manera más clara, el bandeado de la estructura, esto concuerda con la teoría acerca del revenido que afirma que los cambios en la martensita se notan de manera metalográfica con el aumento de la temperatura, al tener una mayor refinación y cambio morfológico se empieza a ganar tenacidad, como quedó demostrado en los ensayos de impacto.



Imagen 18. Microestructura acero 5160 revenido a 400°C. 500X.

En concordancia con la micrografía del acero revenido a 350°C, en la imagen 18, hay una mayor evidencia de la aparición del carburo épsilon, en la cual se ven una mayor cantidad de precipitados de color blanco bien delimitado y con mayor distribución en la matriz.

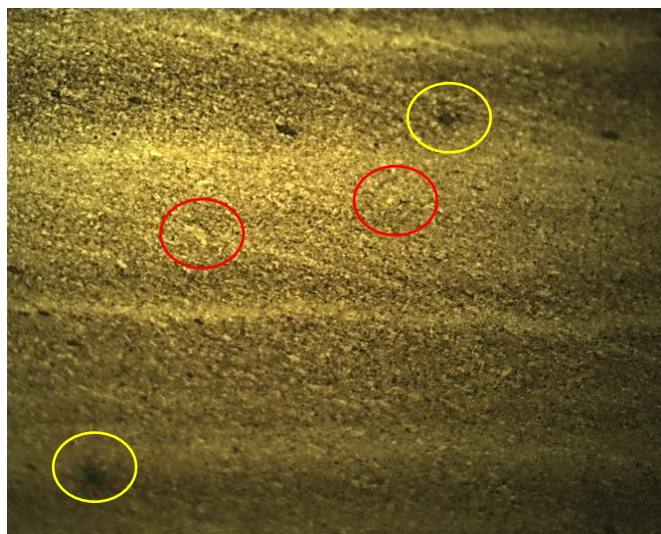


Imagen 19. Microestructura acero 5160 revenido a 450°C. 500X.

El bandeado se hace más evidente en la imagen 19, correspondiente al acero revenido a 450°C, igual la presencia de precipitados (carburo épsilon) y de una microestructura más homogénea, esto se debe a que a mayor temperatura se tienen mejores mecanismos de activación (círculos rojos), con respecto a las zonas oscuras (amarillo) se pueden asociar a diversas contaminaciones durante la manipulación de los laboratorios.

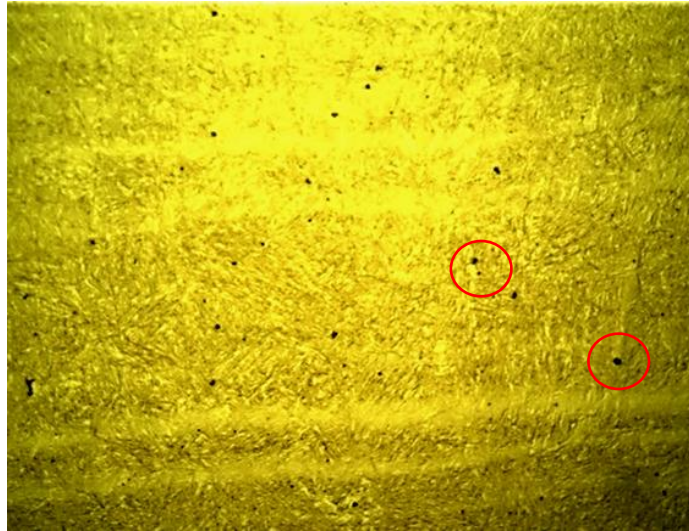


Imagen 20. Microestructura acero 5160 revenido a 500°C. 500X.

La globalización de la cementita empieza a aparecer y la recrystalización de la ferrita empieza a hacerse notoria, la imagen 20, muestra estos fenómenos al verse una estructura con mayor redondez en los límites de grano, con la evidencia del bandeado, efecto que se debe al sentido del corte de las probetas, hay la presencia de inclusiones, que pueden ser óxidos (puntos negros) debido al tiempo de trabajo de las probetas.

En la imagen 21, se puede observar la estructura típica de una martensita revenida, donde la principal característica se denota en la globalización de la cementita y la aparición de ferrita recrystalizada, en las pruebas de impacto se evidenció el aumento de la tenacidad, especialmente atribuible a la ferrita.

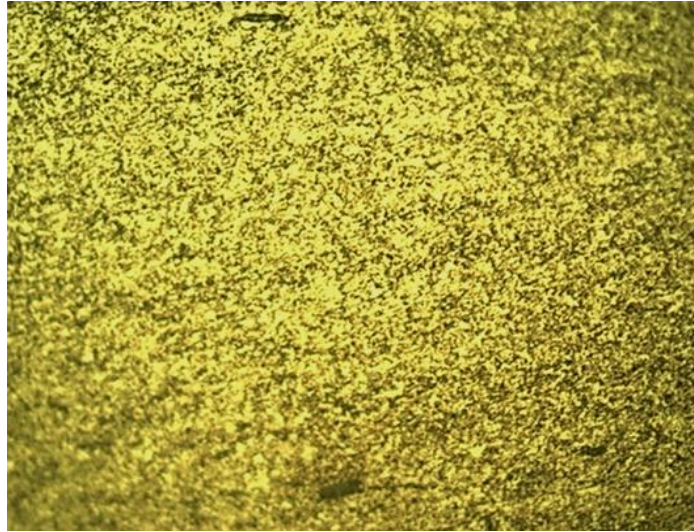


Imagen 21. Microestructura acero 5160 revenido a 550°C. 500X.

Desde el punto de vista microestructural este análisis concluye con la imagen 22, que corresponde a la micrografía del acero revenido a 600°C, en el cual se aprecia una estructura muy similar a la obtenida en condiciones iniciales, donde la presencia de cementita globulizada es notoria y hay trazas de ferrita, aunque sería muy arriesgado asegurar que la martensita se revino totalmente, pues esta técnica no da las herramientas suficientes para emitir un concepto veraz, se propuso realizar un análisis que permitiera tener más elementos de juicio, por esta razón se realizaron SEM y DRX a las muestras tratadas.

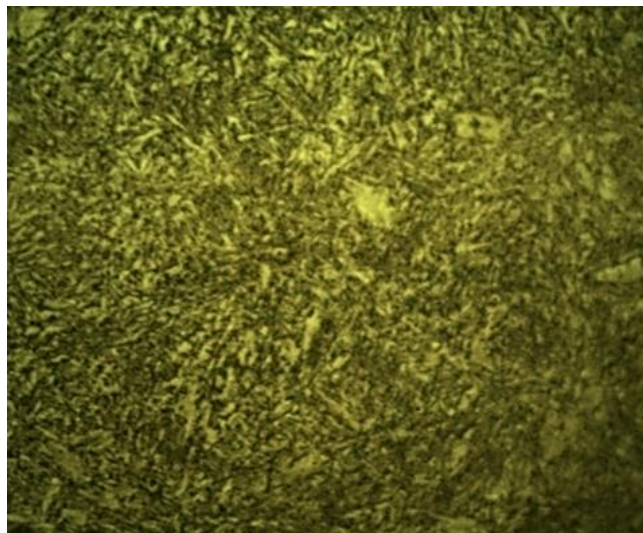


Imagen 22. Microestructura acero 5160 revenido a 600°C. 500X.

15.3. Microscopia Electrónica de Barrido “SEM”

Con la ayuda de la técnica SEM se realizaron análisis de las fracturas provenientes de las probetas de impacto, al ser una técnica electrónica permite

una resolución mucho mayor de las imágenes logrando observar detalles que en la técnica convencional no son evidentes.

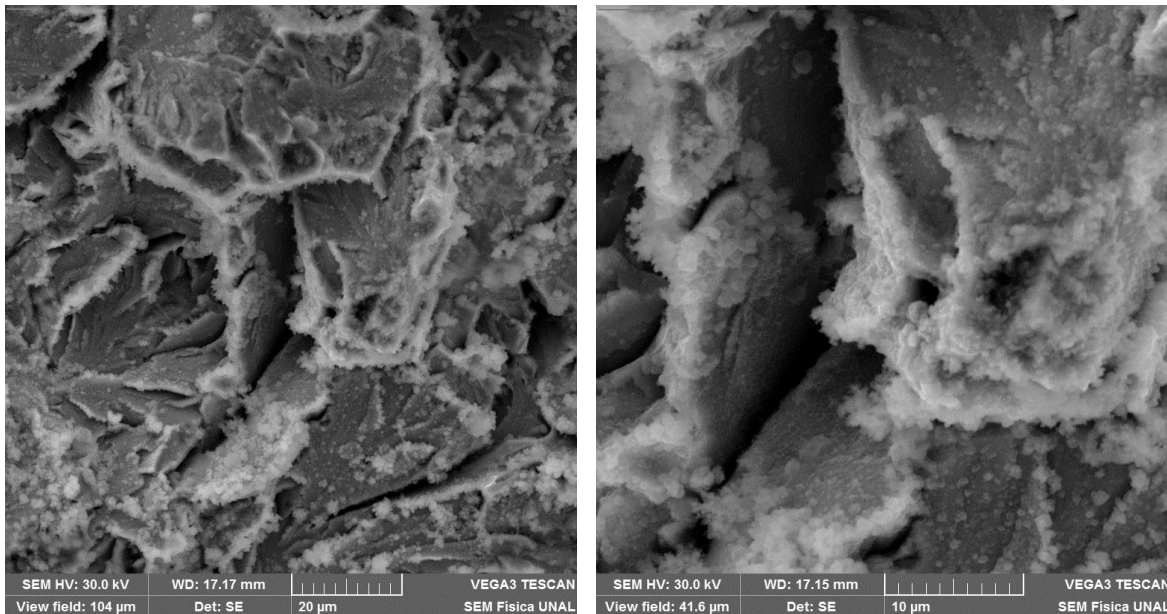


Imagen 23. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 sin T.T.

En estado de entrega las superficies de fractura muestran un aspecto con un elevado grado de contaminación debido a la inadecuada manipulación de la muestra, pero de todas formas se puede resaltar que hay presencia de clivaje en la fractura, este tipo de morfología es común en superficies o materiales que poseen cierto grado de fragilidad, como el material venía en estado bonificado se puede afirmar que este comportamiento es normal, la imagen 23 muestra las imágenes SEM de la superficie fracturada del material en estado de entrega.

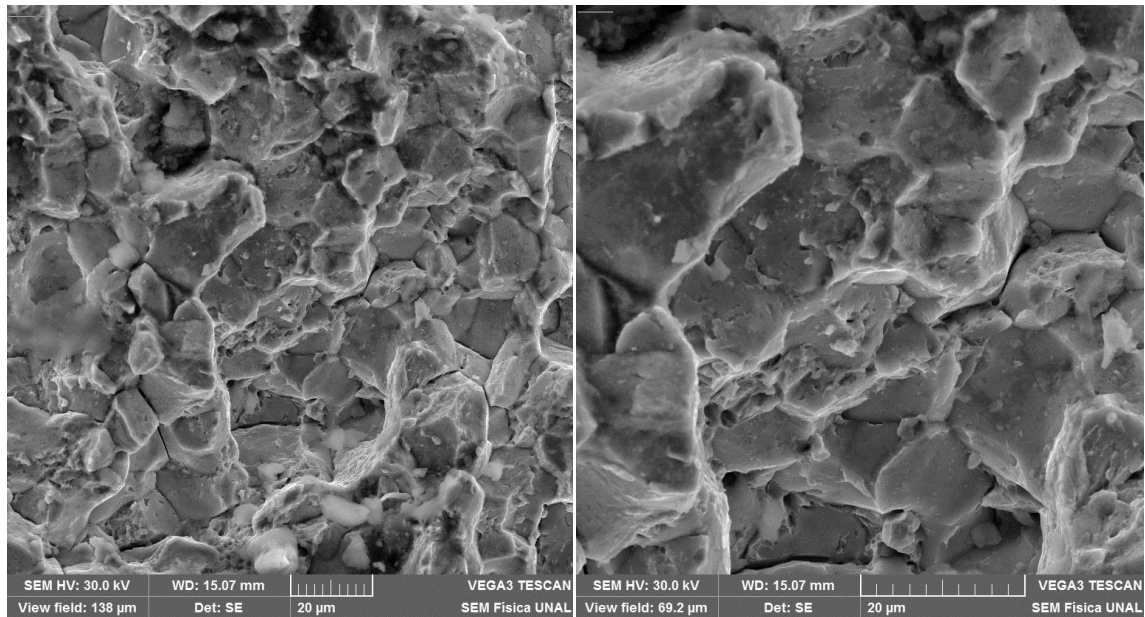


Imagen 24. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 150°C.

En la imagen 24. Se observa la superficie de fractura del material 5160 revenido a 150°C, hay una fuerte evidencia de clivaje, y se aprecia de manera notoria que la fractura es trasngranular, con presencia de grietas muy probablemente en los límites de grano, hay presencia de agujeros, los cuales podrían asociarse a que en ellos se hubiesen alojado carburos o inclusiones no metálicas.

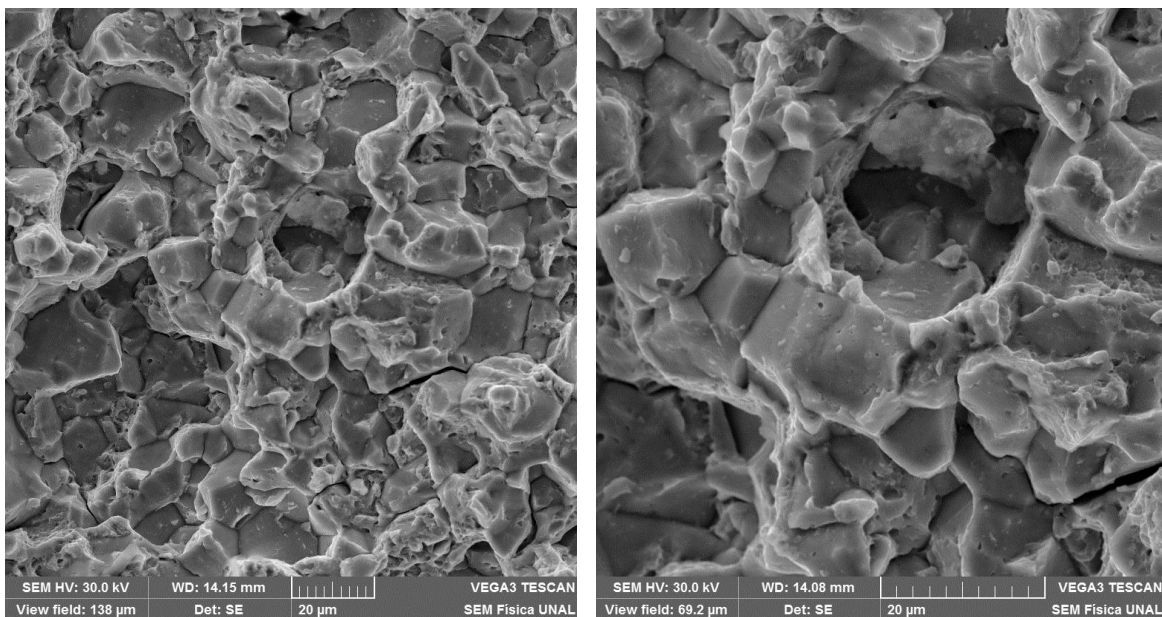


Imagen 25. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 200°C.

A 200°C de temperatura de revenido sigue apreciándose clivaje y fractura trasngranular, con presencia también de grietas en los límites de grano, este comportamiento se puede justificar por la templabilidad del acero y la cantidad de martensita obtenida, esto también confirma los valores tan bajos de tenacidad obtenidos de los ensayos de impacto, la imagen 25 muestra las imágenes SEM a 1500X y 3000X de la superficie de fractura.

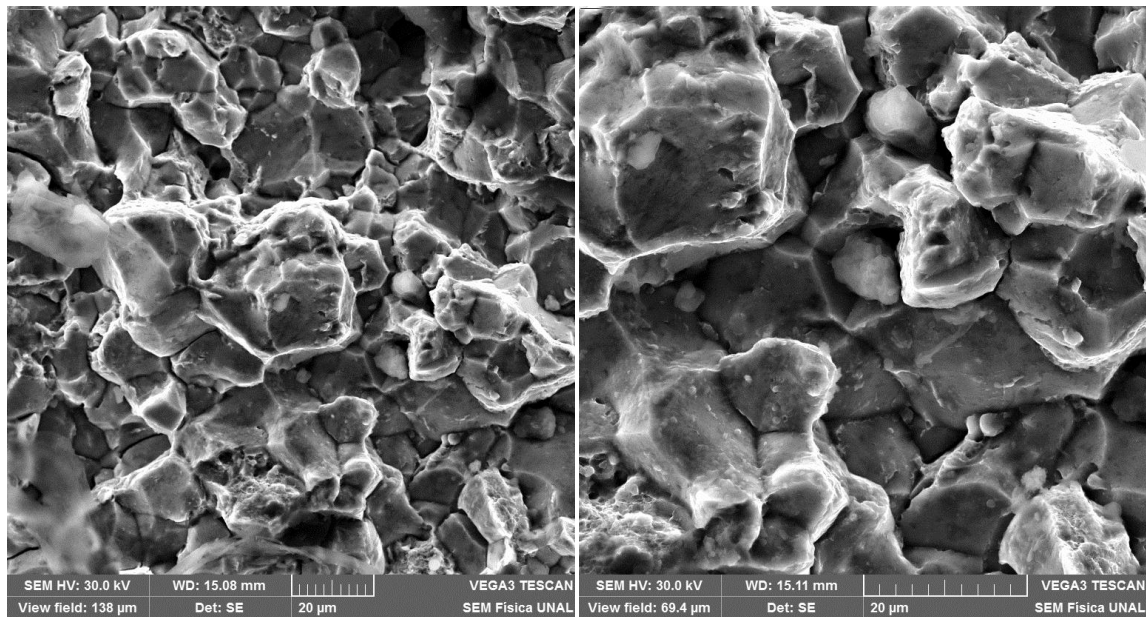
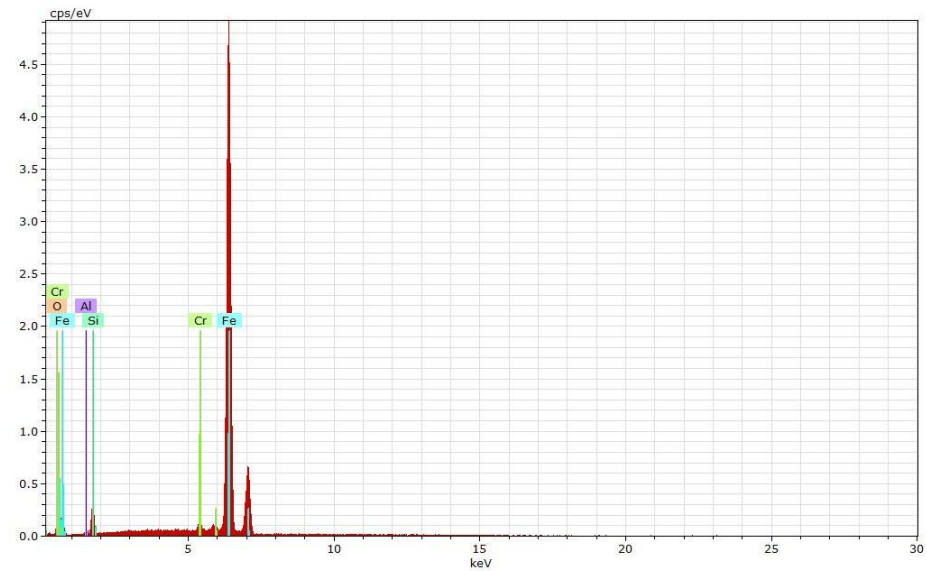


Imagen 26. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 250°C.

En las imágenes SEM tomadas a la superficie de fractura del acero 5160 revenido a 250°C que se aprecian en la imagen 26, se pueden empezar a apreciar pequeñas zonas de desgarre, pero con una predominancia de clivaje, también aparecen pequeñas partículas ubicadas en los límites de grano que podrían ser carburos, de manera específica, carburo épsilon, pero al realizar el análisis con la sonda EDS los resultados muestran la presencia de elementos como aluminio (Al), silicio (Si) y oxígeno (O), lo cual llevaría a pensar que se trata de rastros de impurezas, óxidos, silicatos o aluminatos.

En la gráfica 3, extraída por medio de la técnica de Difracción de Rayos X, por sonda EDS se puede ver pero no afirmar, que los picos característicos de algunos elementos químicos del Acero SAE 5160 sean parte de este desde la fundición del material, ya que el equipo hace un análisis semicuantitativo y semicualitativo dando lugar a muchas predicciones.



Spectrum: AM8 1747

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	98.45	86.67	73.26	2.58
Si	14	K-series	8.84	7.78	13.08	0.56
O	8	K-series	4.46	3.93	11.59	1.47
Cr	24	K-series	1.03	0.91	0.83	0.08
Al	13	K-series	0.81	0.71	1.24	0.15
Total:			113.59	100.00	100.00	

Gráfica 4. Análisis EDS superficie de fractura acero 5160 a 250°C.

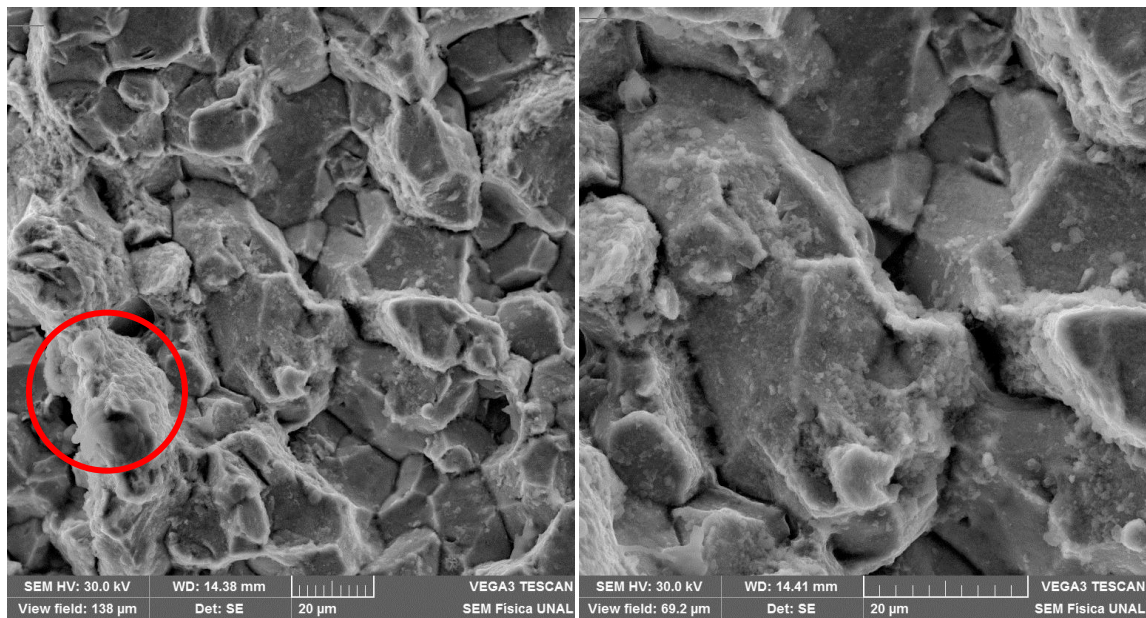


Imagen 27. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 300°C.

La imagen 27, muestra las micrografías SEM a 1500X y 3000X del acero revenido a 300°C, aparecen zonas de desgarró señaladas por el círculo rojo, casi

microvacíos, que evidenciarían que el aumento de la temperatura genera algo de ductilidad caracterizado por esta morfología, pero que a nivel de valores de tenacidad aún no se ven reflejados de manera evidente, es de aclarar que las micrografías parecen tener nuevamente suciedad producto de la regular preparación de las muestras.

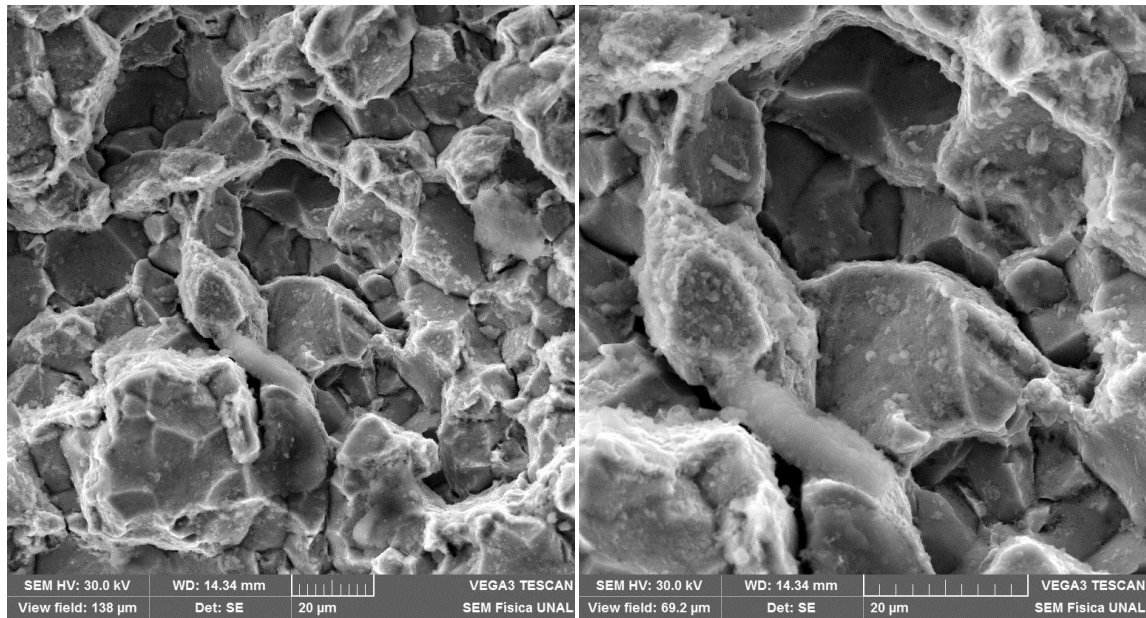


Imagen 28. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 350°C

A 350°C de temperatura de revenido la superficie de fractura sigue teniendo la morfología típica de materiales frágiles, es decir clivaje, los granos fracturados presentan superficies lisas y fracturados transgranularmente, y sin un tamaño homogéneo, lo cual podría decirse que se debe a la transformación que está sufriendo la martensita por efecto de la variación de la temperatura en el revenido, esto se aprecia en la imagen 28.

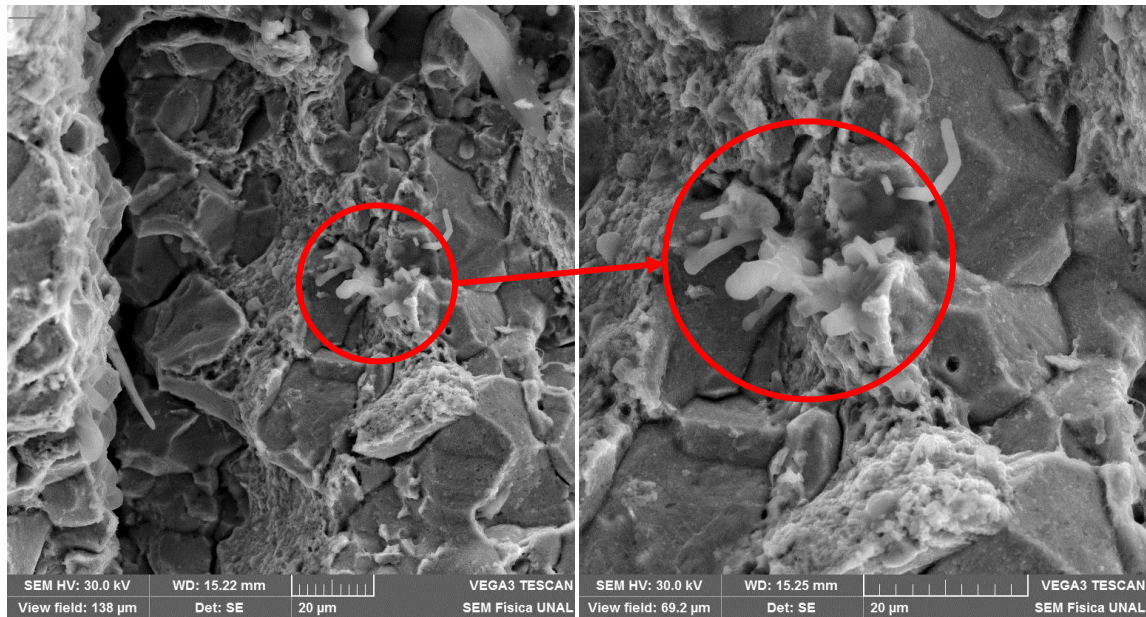
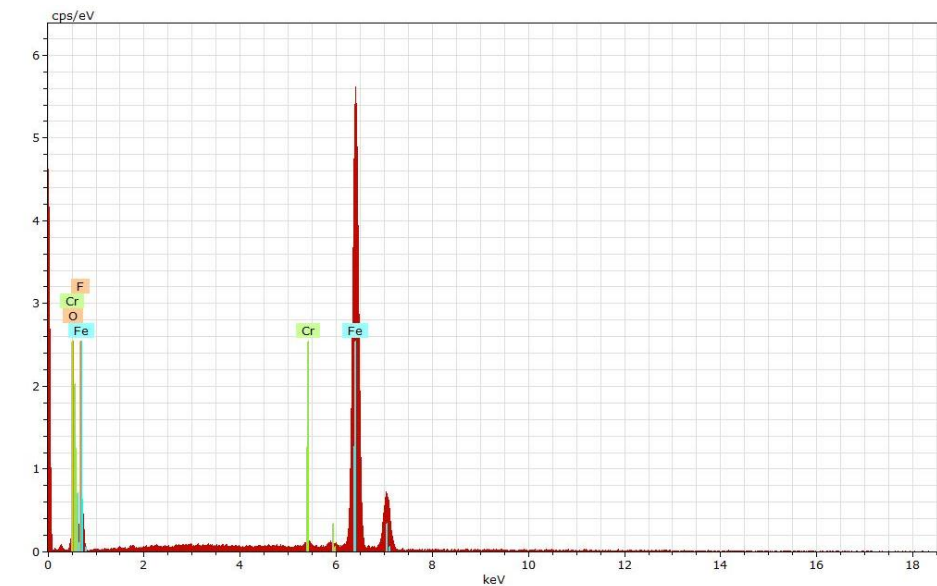


Imagen 29. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 400°C

Durante el proceso de revenido y según lo que reportan los artículos y la literatura que trata el tema, hay un rango de temperaturas a los cuales se precipita el carburo épsilon, en la microscopia óptica convencional es muy difícil determinar la presencia de este, así que con la ayuda del SEM se podría inferir su presencia, aunque la técnica adecuada es el DRX o el TEM, la imagen 29. Muestra la superficie fracturada del acero revenido a 400°C, donde llama la atención la inclusión que se señala en las micrografías, al realizar el análisis EDS de la diagrama 4. los elementos detectados por la sonda muestran la presencia de cromo (Cr), elemento principal del acero y nuevamente se detecta oxígeno (O), al parecer se trata de algún tipo de óxido pero lo más llamativo es que al parecer esta incrustado en la matriz, por la apariencia del “defecto” pareciera que se tratara de una inclusión de escoria, lo cual no es del todo desacertado ya que en los procesos de fundición suele suceder que parte de la escoria del baño se meta en el sólido que en algunas ocasiones “desaparece” en el proceso de laminación en caliente, un detalle que llamo poderosamente la atención, ya que los aceros no estarían limpios y tendrían un proceso metalúrgico regular.

Para los 450°C de temperatura de revenido del acero, la imagen 30. muestra la micrografía SEM, se evidencia una presencia más notoria de superficies desgarradas o de microvacíos y en la fractura ya aparece la morfología asociada al cuasi-clivaje, es decir zonas de fractura con una presencia algo



Spectrum: AM8 1751

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	101.25	90.44	75.08	2.66
O	8	K-series	6.79	6.07	17.58	1.93
F	9	K-series	3.06	2.73	6.66	1.02
Cr	24	K-series	0.86	0.77	0.69	0.07

Total: 111.96 100.00 100.00

Gráfica 5. Análisis EDS superficie de fractura acero 5160 a 450°C.

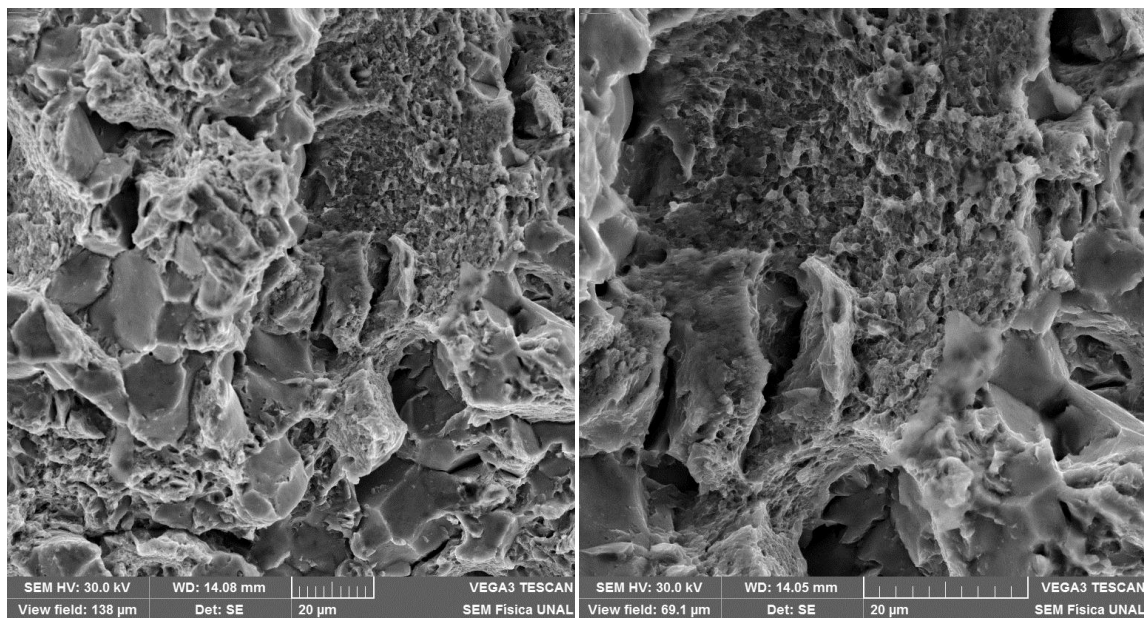


Imagen 30. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 450°C.

mayor de zonas deformadas plásticamente, este es un indicador de la transformación que ha venido teniendo la martensita por efecto del aumento de la temperatura de revenido, esto permite afirmar que se ha aumentado la zona de deformación plástica lo que significa mayor valor en la tenacidad.

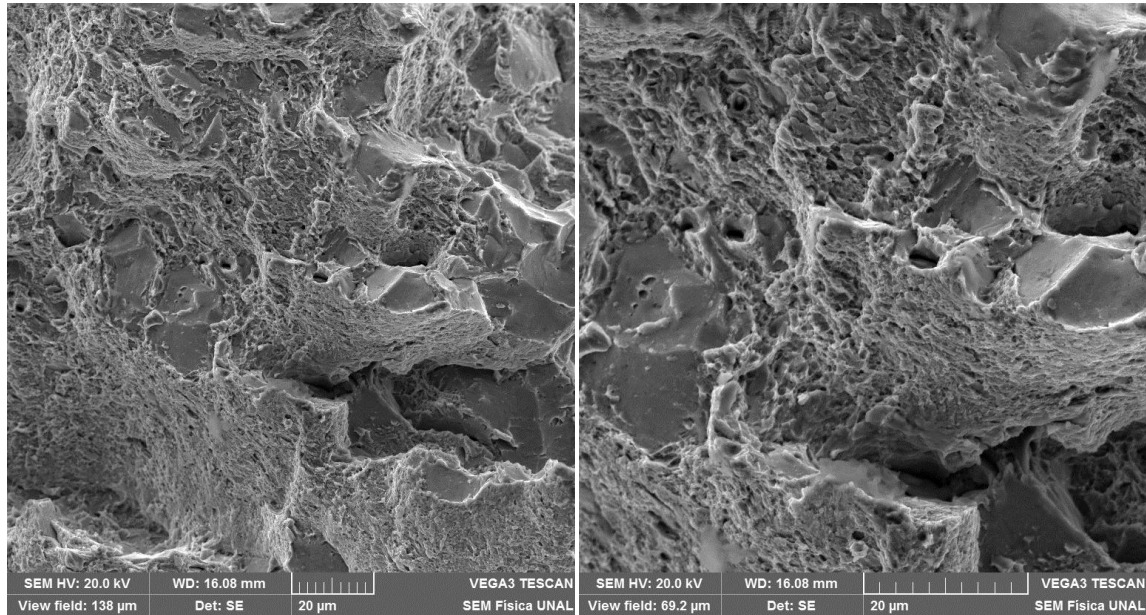


Imagen 31. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 500°C.

La imagen 31. Muestra una superficie de fractura donde comienza a prevalecer la presencia de microvacíos, con algunas regiones de menor presencia de cuasi-clivaje, esto es resultado de la temperatura de revenido, que, a pesar de ser alta, pues se realizó a 500°C no hay una transformación total de la martensita, es decir, así se siga aumentando la temperatura de revenido, mientras no se supere la temperatura de A_1 siempre habrá presencia de martensita.

En la imagen 32. Se nota la presencia aún más significativa de microvacíos, aunque no desaparecen de manera total las zonas de cuasi-clivaje, esto ratifica la teoría que se expuso en el párrafo anterior, es decir que la martensita no se transforma totalmente, quizá también atribuido al tiempo de permanencia a temperatura de revenido, pues cabe recordar que se trata de un proceso cinético de transformación el cual implica el efecto del tiempo.

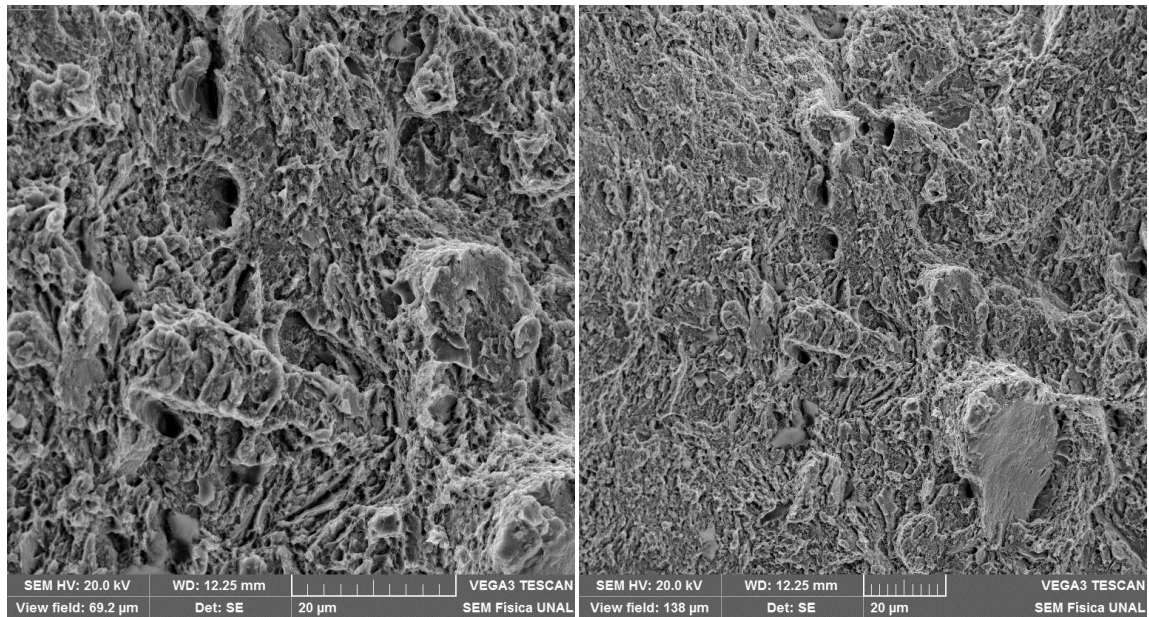


Imagen 32. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 550°C.

A 600°C al parecer toda la superficie de fractura tiene apariencia de microvacíos, esto indicaría, en primer lugar, que la martensita se transformó totalmente y segundo que los pocos granos que presentan cuasi-clivaje son insignificantes y no tienen un efecto significativo en la tenacidad, la imagen 33. Muestra la micrografía SEM de la zona, a pesar de que hay una supuesta presencia de partículas dispersas, en menor cantidad que a temperaturas más bajas.

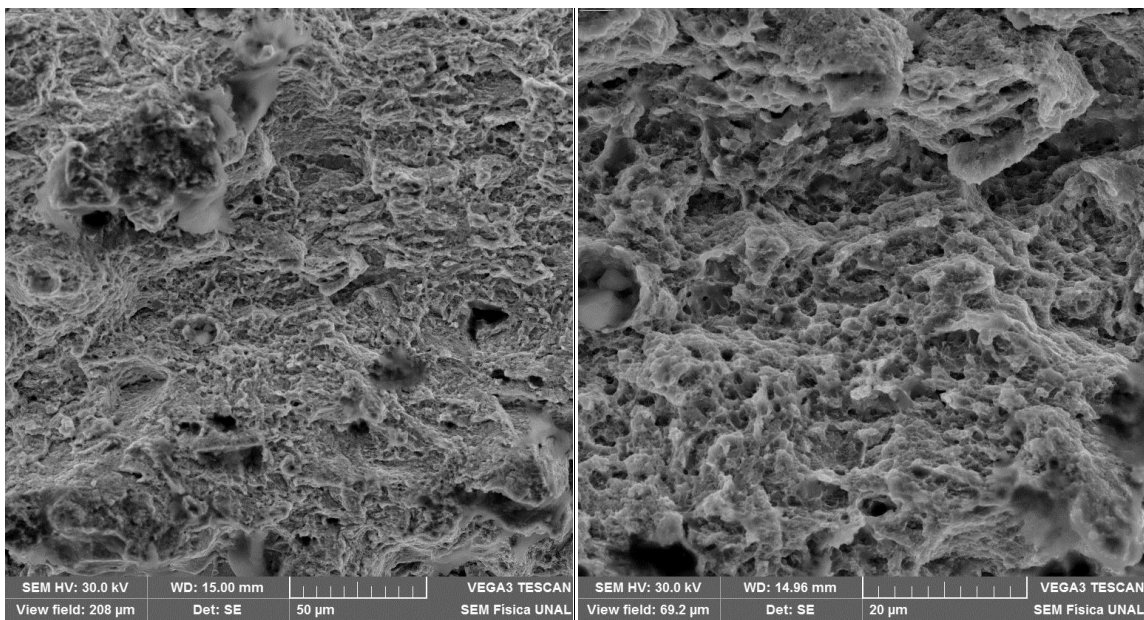


Imagen 33. Micrografía SEM superficie de fractura acero 5160 a 600°C.

Los EDS de las demás muestras se adjuntan al documento como anexos, pero en términos generales no muestran elementos desconocidos o que no deban estar presentes en el material.

15.4. Difracción de Rayos X “DRX”

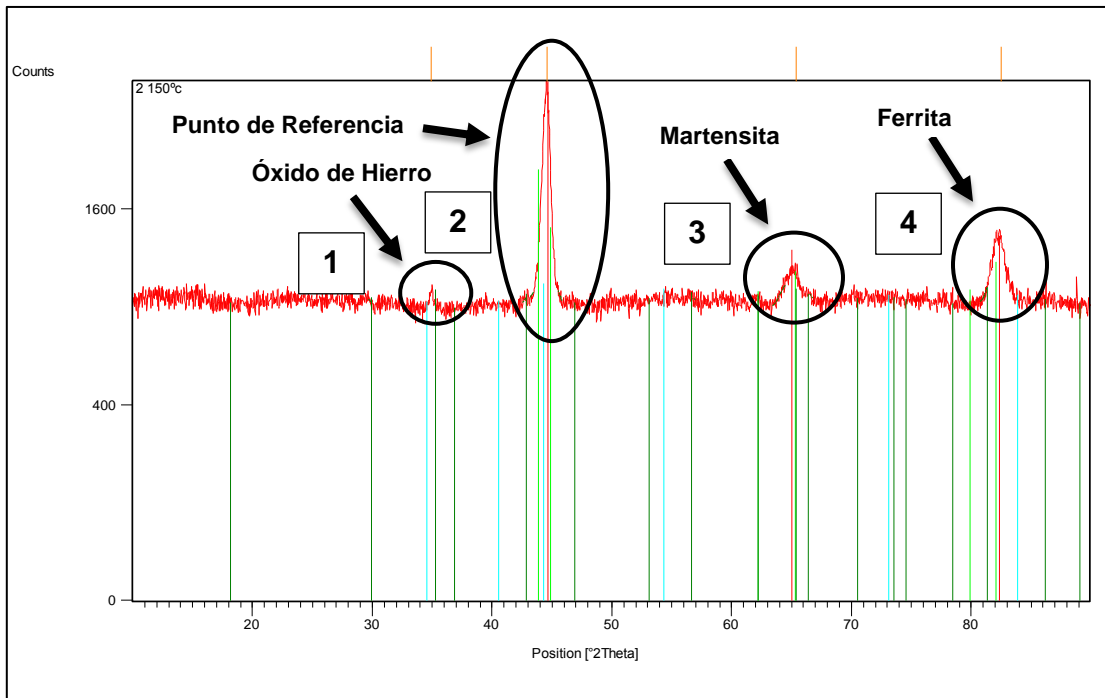
Las muestras de acero fueron medidas en el difractómetro XPert – PRO de la casa PanAlytica, implementado con tubo de ánodo de cobre, con potencia de trabajo de 1800 watts, rendija divergente de 0.5°. Las medidas se realizaron con un barrido de 10 a 90° 2θ a un paso de 3° 2θ.

Los análisis de los datos de difracción se realizaron con ayuda del software Xpert.Plus y XPowder. De acuerdo con el análisis cualitativo de las muestras, se encuentra la presencia de Hierro alfa codificado por la ICDD como 01-087-0721 y martensita (CFe) codificado por la ICDD como 00-044-1292. La proporción de estas fases varía en cada caso y se presentan a continuación.

La figura 5 muestra los resultados del DRX para la probeta con temperatura de revenido a 150°C, donde se presentan los picos de difracción para la ferrita, martensita y óxido de hierro (picos superiores), estos datos no se toman sin ningún análisis previo, esto se da por que las muchas líneas delgadas que están en la parte inferior de los tres picos notables, son las que muestran las coincidencias del material y de esta manera filtrar los picos superiores que son los que vamos a analizar.

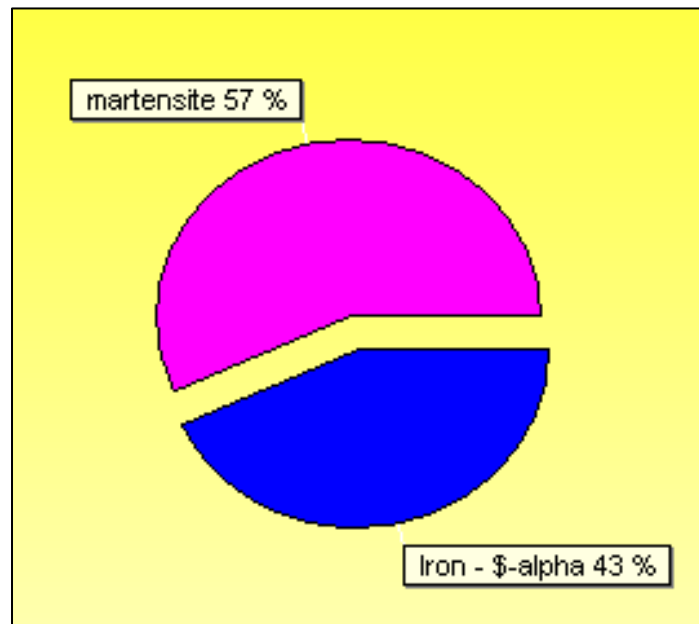
En la Gráfica 5, se muestran 3 picos señalados que hacen relación, el primero de izquierda a derecha, al óxido de hierro en el material, el segundo a un punto de referencia, el tercero a la Martensita y el cuarto a la Ferrita, cabe aclarar que durante el proceso de revenido los picos entre la Martensita y la Ferrita serán muy similares, pero al final se notara la diferencia de alturas entre los picos de la gráfica dando lugar a la transformación de la martensita en ferrita.

Para tener una visión más clara de cómo la Martensita se va transformando durante el proceso de revenido, la técnica de DRX, también elabora un diagrama en forma de torta, en donde se puede ver semicuantitativamente los valores en % como cambian durante el proceso.



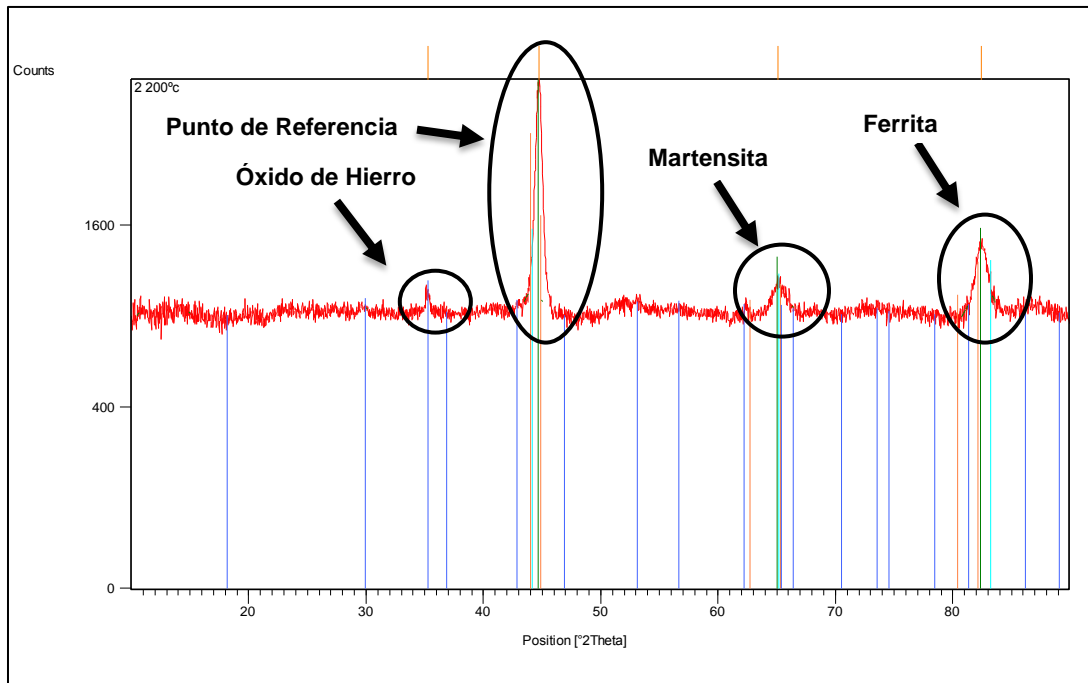
Gráfica 6. DRX Acero 5160 templado y revenido a 150°C

El programa permite realizar un análisis semicuantitativo que se aprecia en la gráfica 6, en el cual se infiere la cantidad de fases significativas presentes.



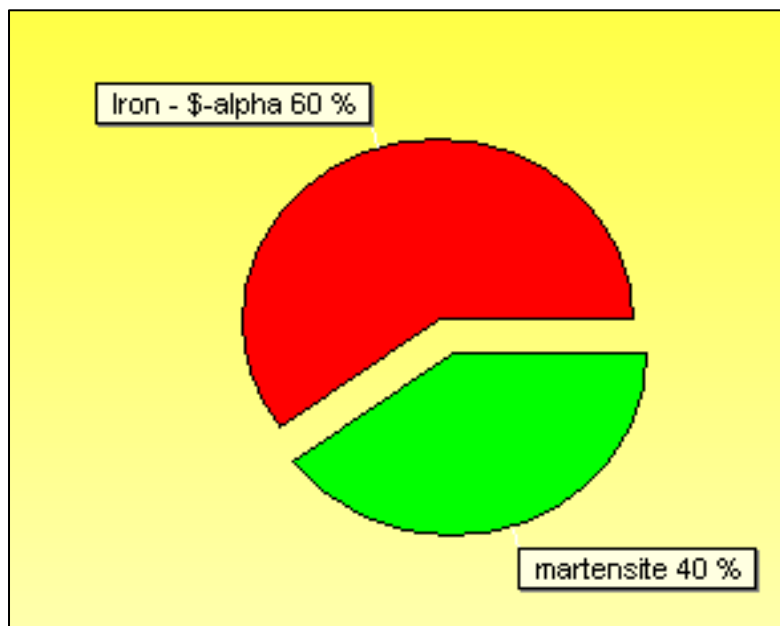
Gráfica 7. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido a 150°C

Para las demás temperaturas se realizaron los mismos análisis donde lo más significativo es determinar que a medida que se va aumentando la temperatura de revenido la cantidad estimada por el programa de martensita va disminuyendo, pero de ninguna forma desaparece totalmente.

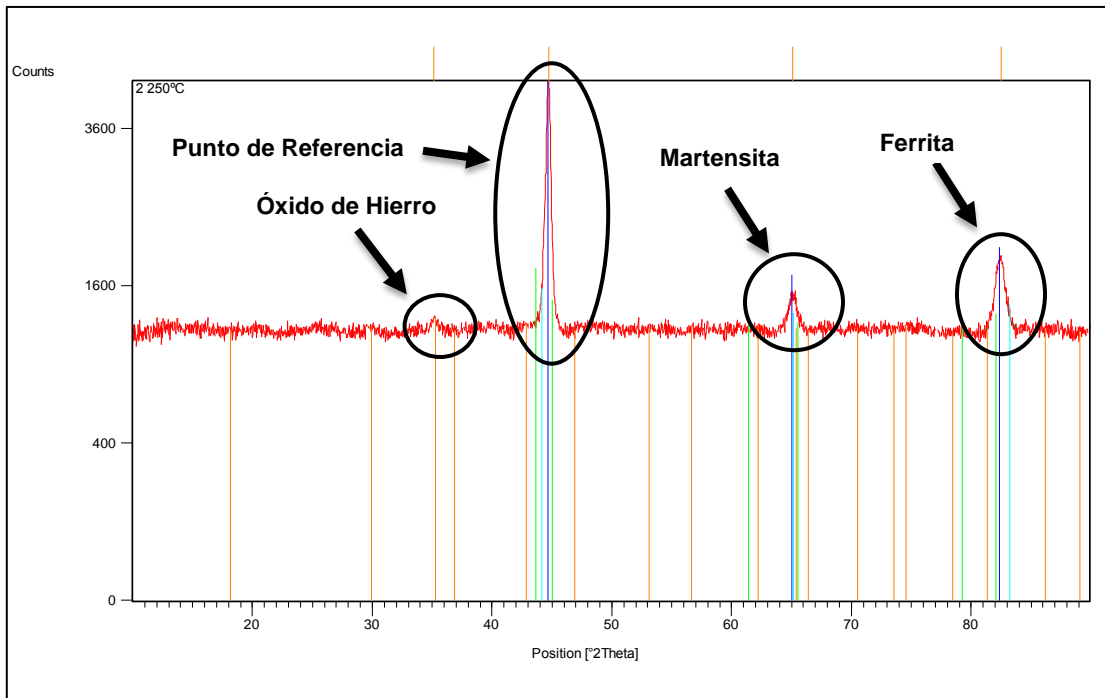


Gráfica 8. DRX Acero 5160 templado y revenido a 200°C.

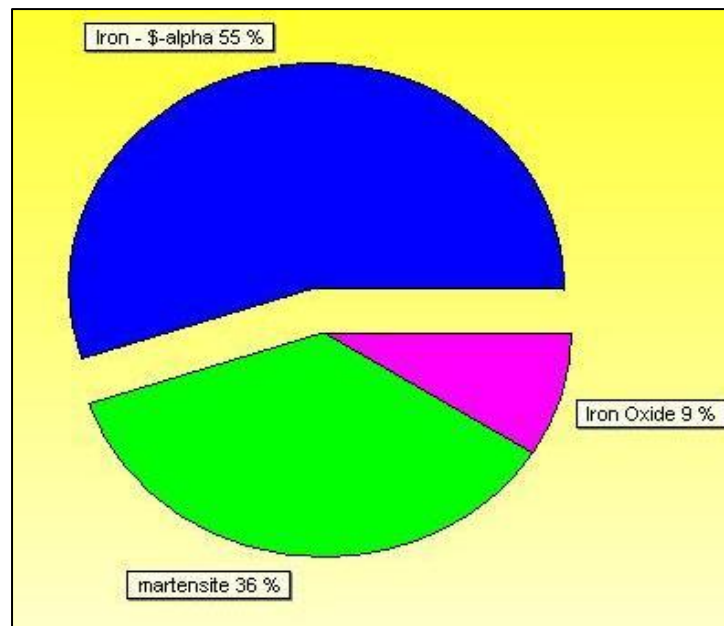
La gráfica 7, muestra el DRX para el acero revenido a 200°C, donde nuevamente se aprecian los picos característicos de la ferrita, la martensita y el óxido presente en la muestra. La gráfica 8 muestra el análisis semicuantitativo de la muestra.



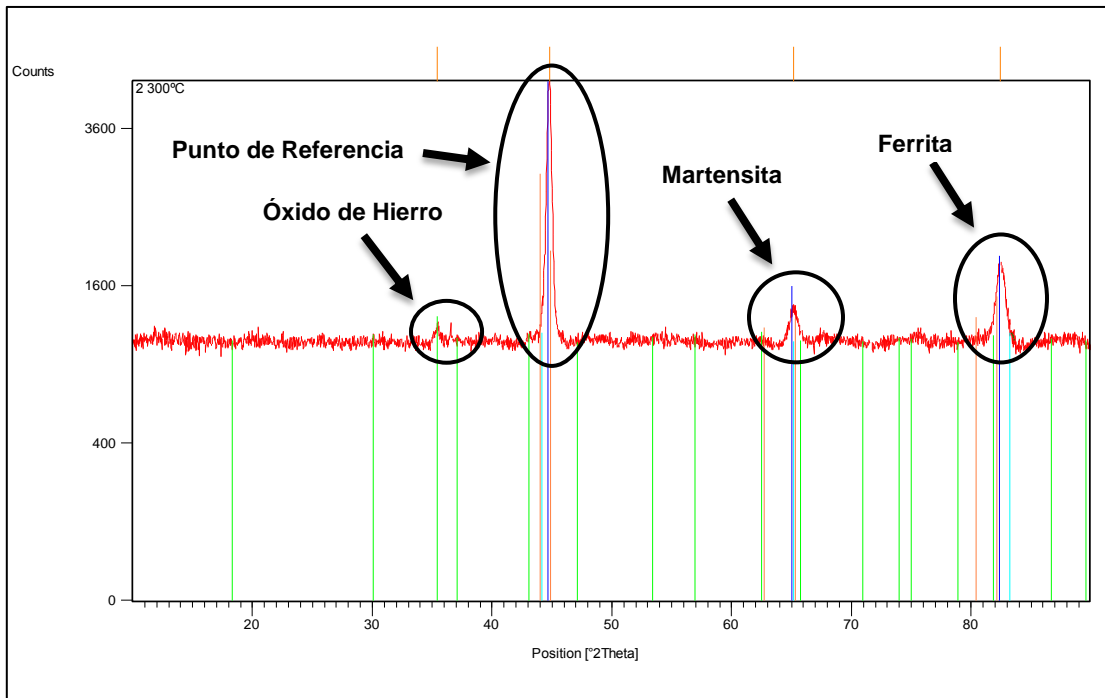
Gráfica 9. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 200°C.



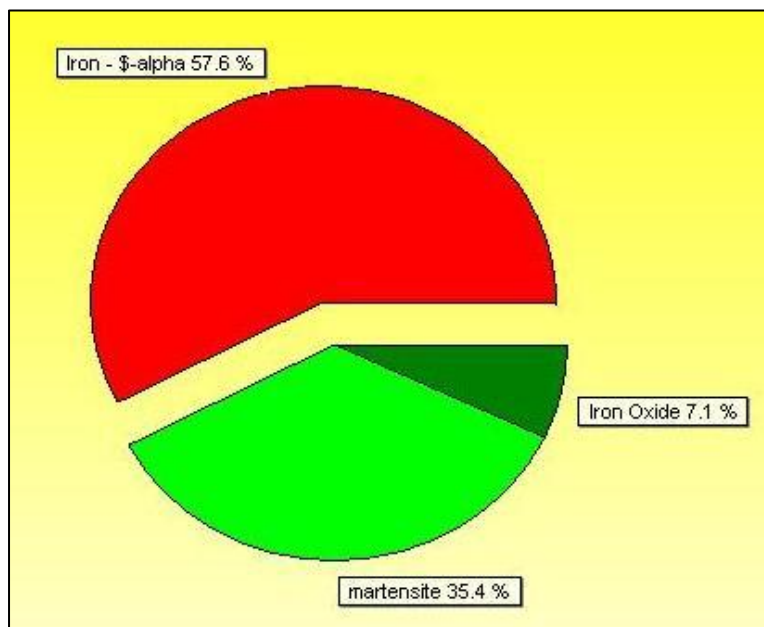
Gráfica 10. DRX Acero 5160 templado y revenido a 250°C.



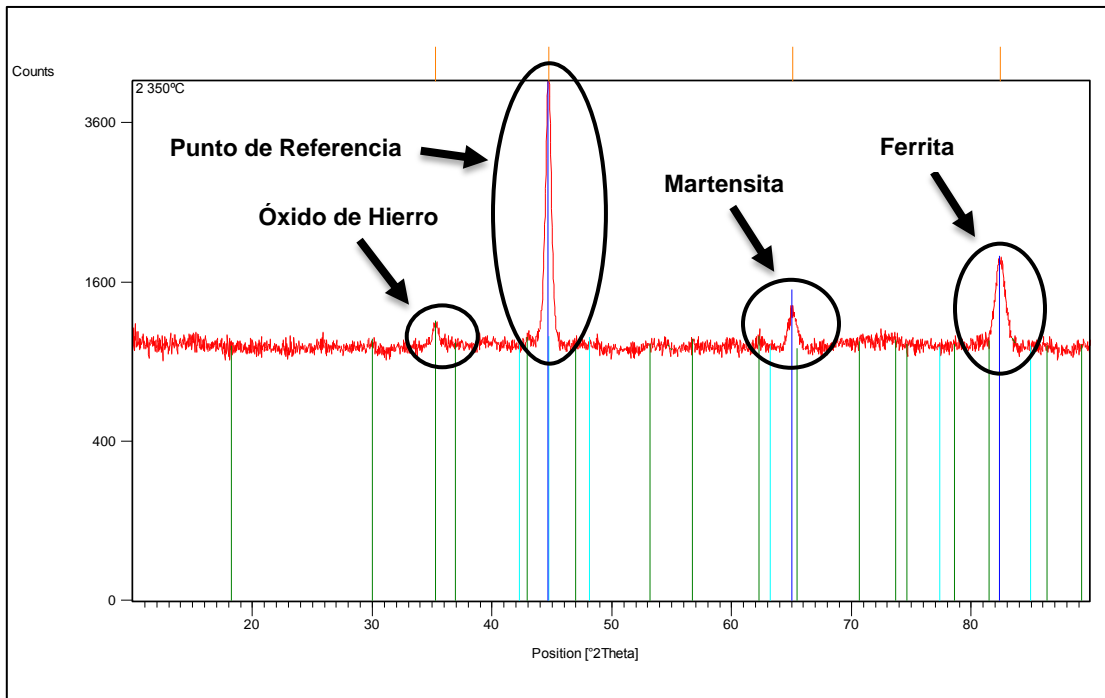
Gráfica 11. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 250°C.



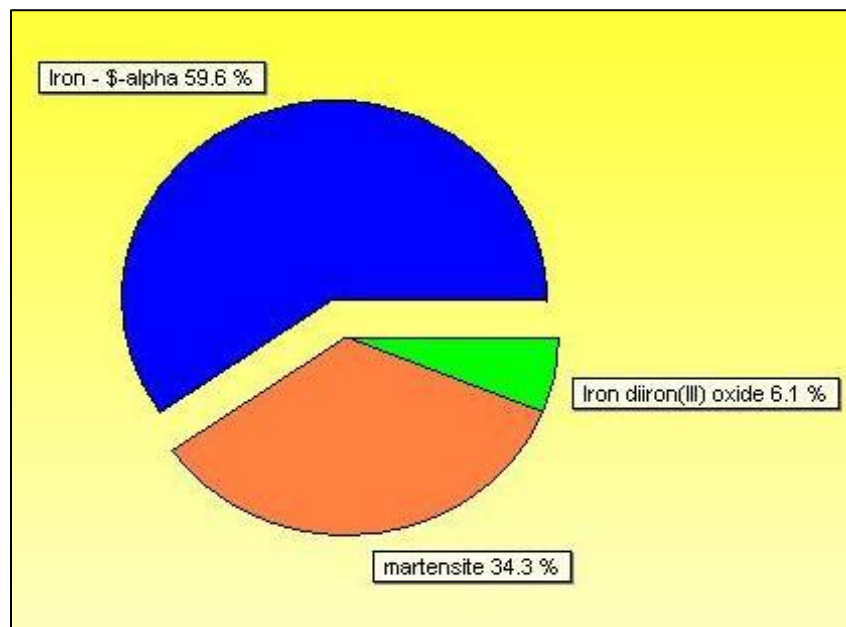
Gráfica 12. DRX Acero 5160 templado y revenido a 300°C.



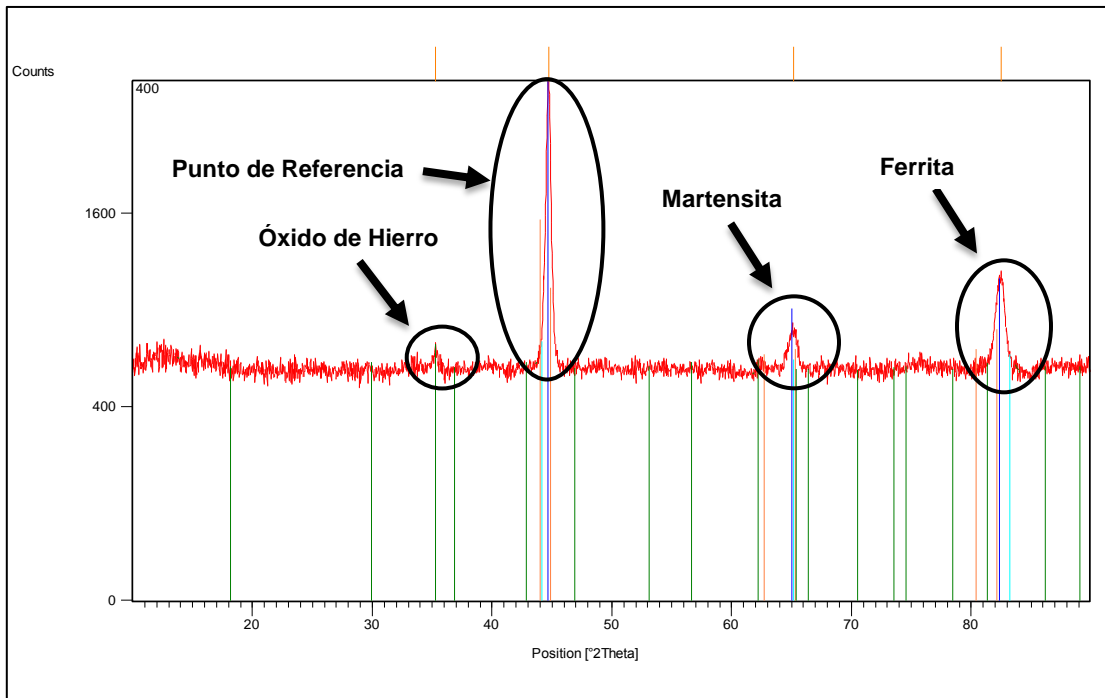
Gráfica 13. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 300°C



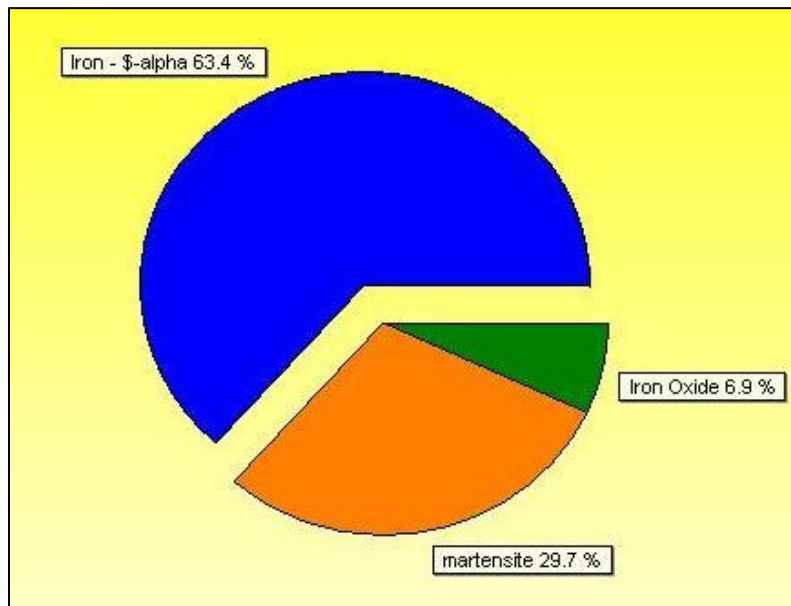
Gráfica 14. DRX Acero 5160 templado y revenido a 350°C.



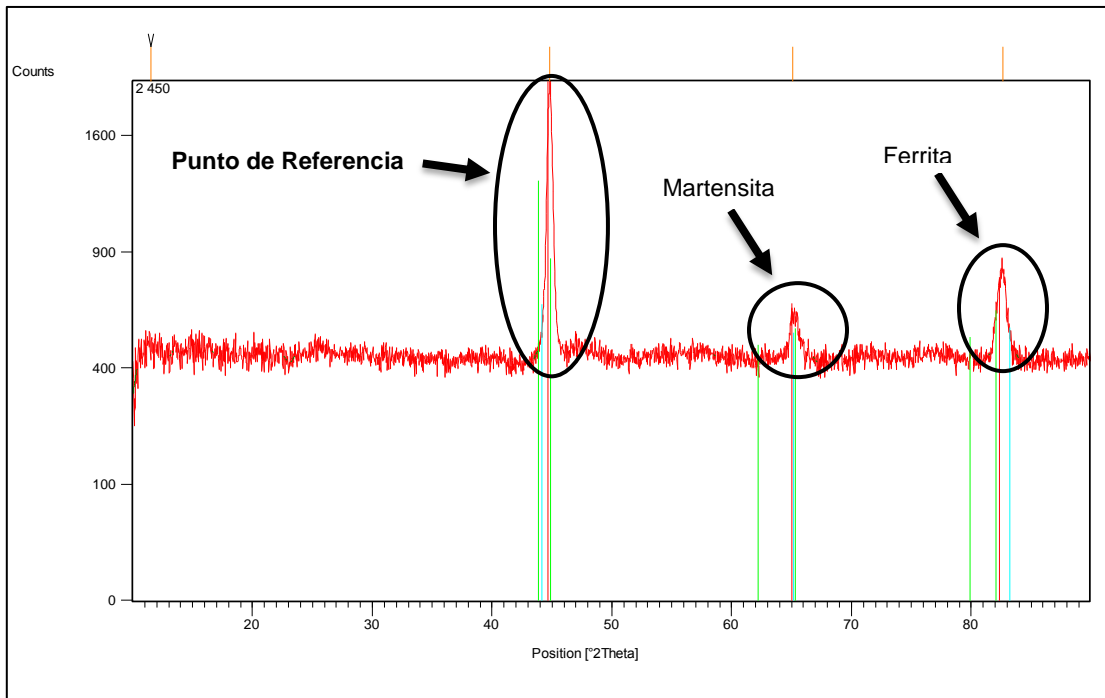
Gráfica 15. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 350°C.



Gráfica 16. DRX Acero 5160 templado y revenido a 400°C.

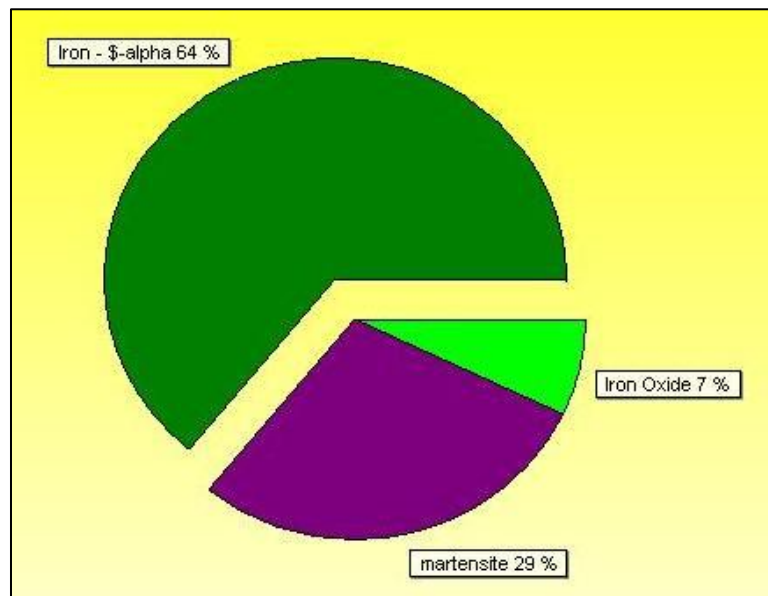


Gráfica 17. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 400°C.

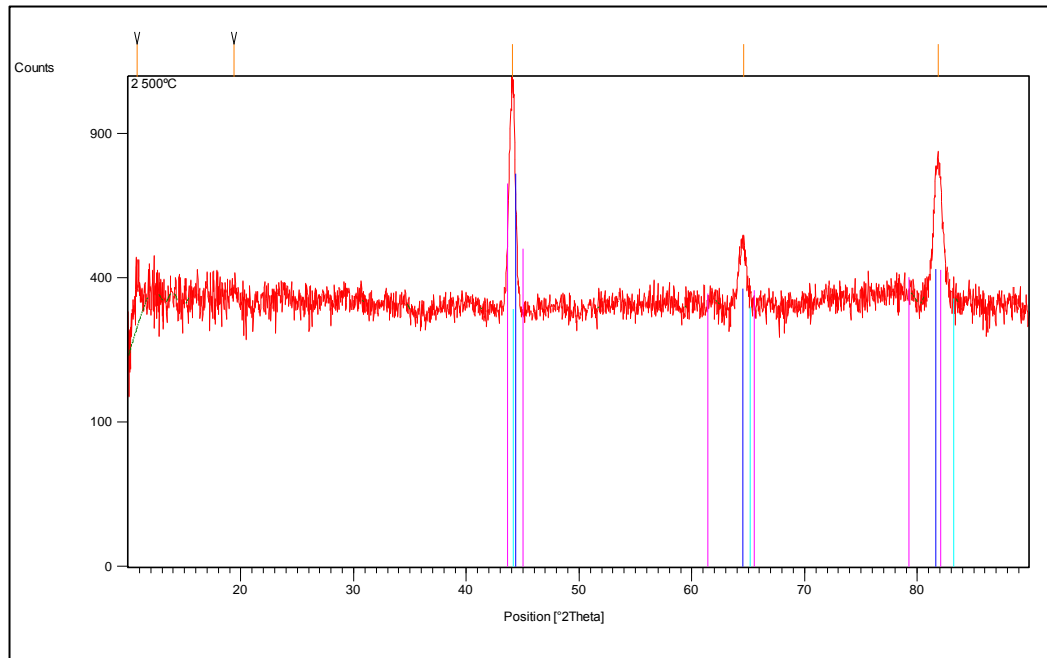


Gráfica 18. DRX Acero 5160 templado y revenido a 450°C.

En la gráfica 17, no se alcanza a apreciar el pico referenciado al óxido de hierro, dicho defecto puede aplicarse al procedimiento del laboratorio pues ya que es una lectura semicualitativa, pero en la gráfica 18, gráfica semicuantitativa si se puede apreciar el óxido con un 7%.



Gráfica 19. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 450°C.

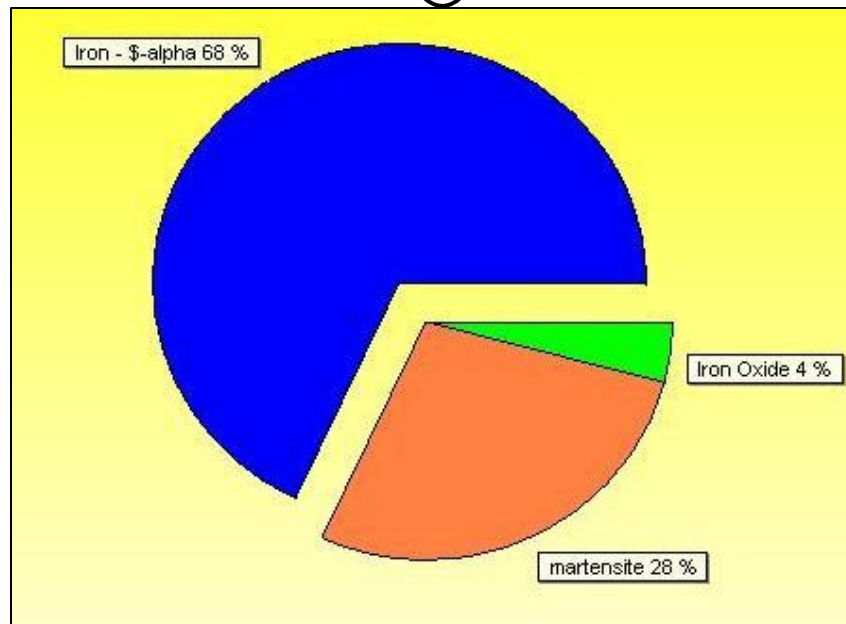


Gráfica 20. DRX Acero 5160 templado y revenido a 500°C.

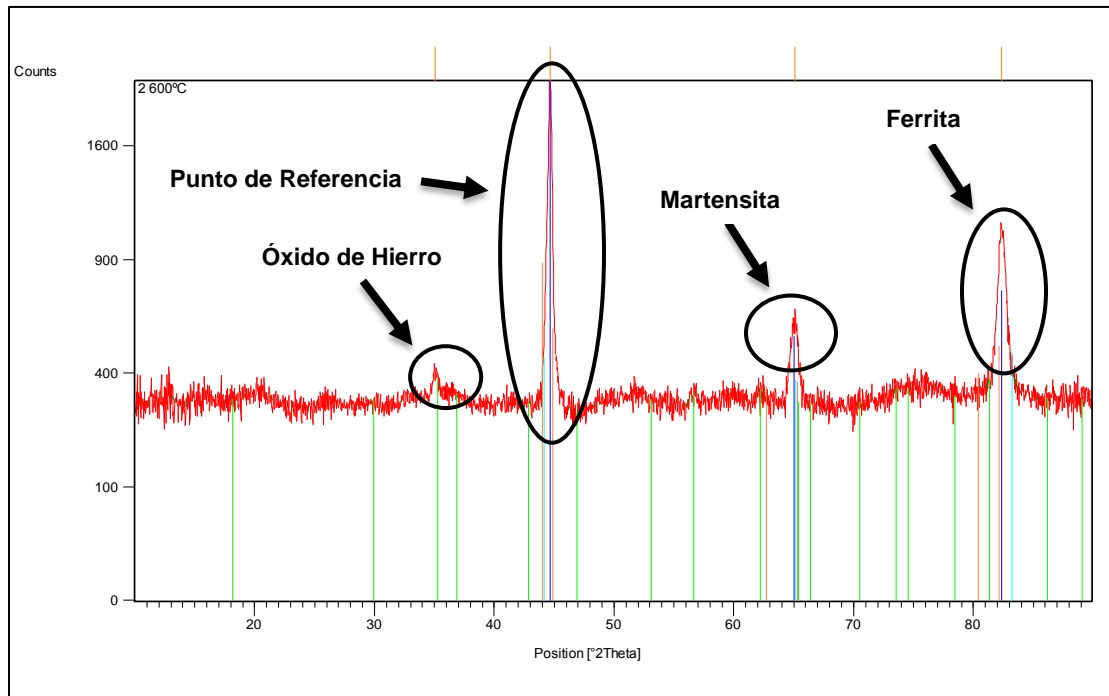
En la gráfica **Punto de Referencia** mismo fenómeno donde no se aprecia el pico referenciado al óxido de hierro, aplicado al procedimiento del laboratorio.

Martensita

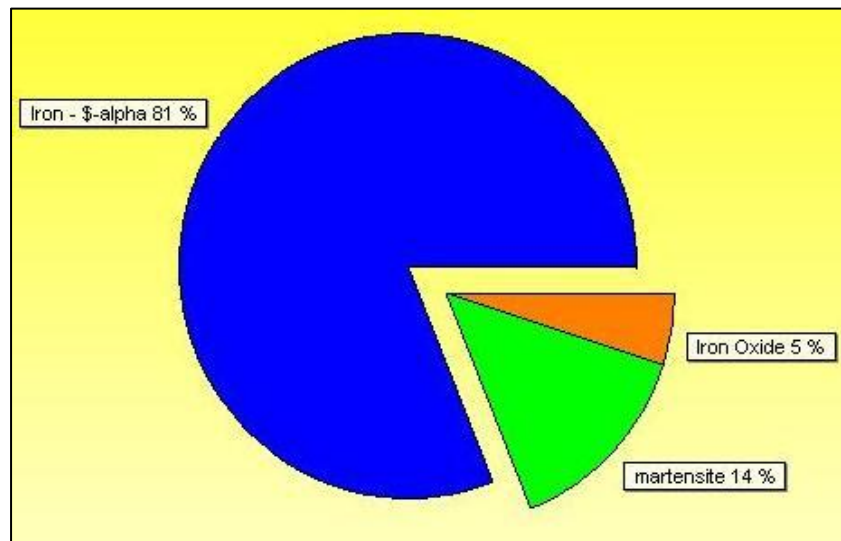
Ferrita



Gráfica 21. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 500°C.



Gráfica 22. DRX Acero 5160 templado y revenido a 600°C.



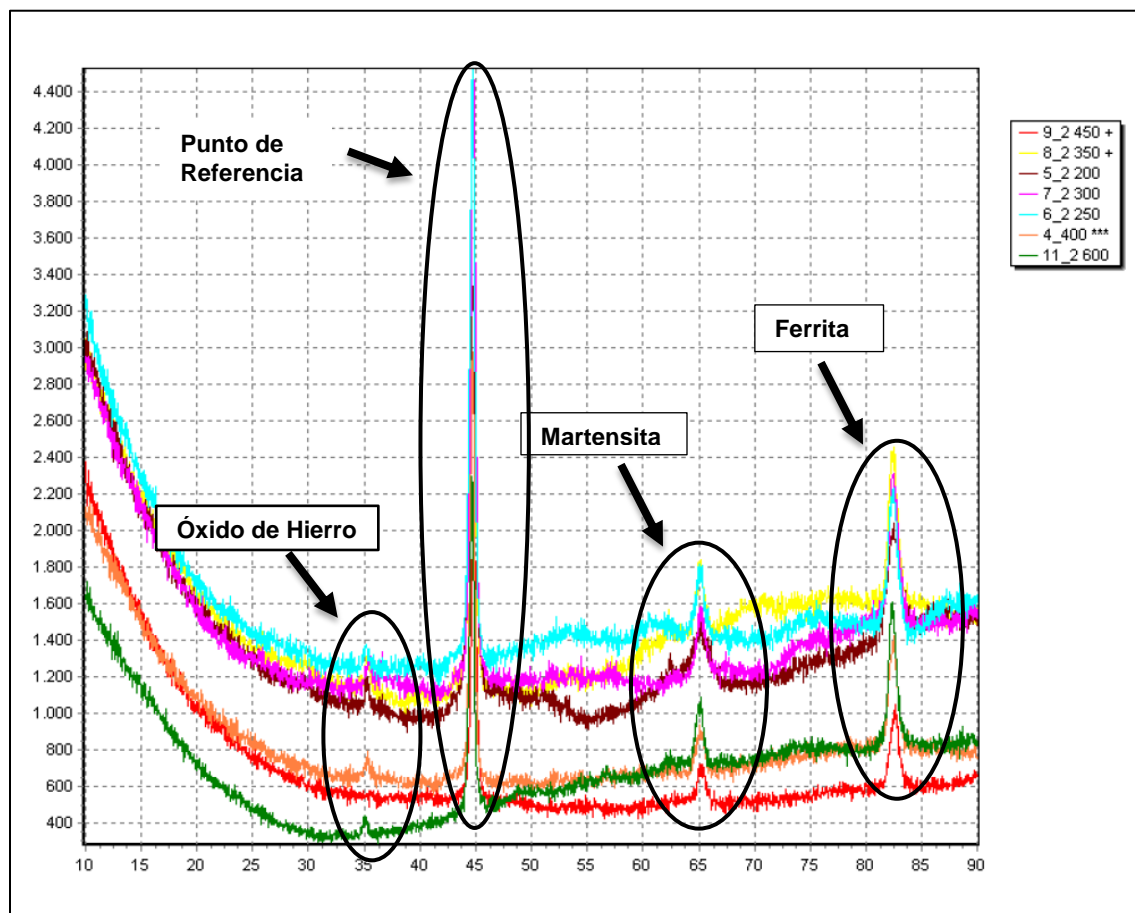
Gráfica 23. Estimada cantidad de fases para temperatura de revenido 600°C.

Del gráfica 5 a la gráfica 22, se muestran los difractogramas para cada temperatura de revenido y los diagramas de estimación de la cantidad de fases presente tanto de martensita como de ferrita a cada temperatura, incluidos los óxidos que se lograron identificar, lo más importante a resaltar en este apartado es que concuerda lo observado en las micrografías SEM con la evolución de la transformación de la martensita, esto quiere decir que aumenta la cantidad de

regiones con cuasi-clivaje y microvacíos a medida que aumenta la temperatura, eso se pudo ratificar con el análisis DRX ya que se evidenció una disminución de la martensita presente del 57% a 150°C hasta el valor de 14% a 600°C.

También es importante aclarar que el haz de rayos X se hizo incidir sobre la superficie fracturada lo cual justifica el ruido presente en cada uno de los difractogramas, esto quedó en evidencia en la muestra a 550°C ya que por su alta zona de deformación plástica los datos obtenidos fueron erróneos, en la figura 46 se muestra un acoplamiento de los resultados de los gráficos DRX y prácticamente se podría decir que no hay una evidencia significativa de la variación del contenido de martensita pues los picos coinciden y no permite ver de manera clara esa condición, pues el pico de la martensita se presenta más o menos en el mismo ángulo 2θ .

A continuación se presenta el conjunto de datos que concuerdan en número de picos, ubicación y relación de intensidades, estos difieren en la intensidad de los picos es decir concentración de cada fase. La muestra 500°C no se ha tenido en cuenta en esta comparación por que la posición de picos no coincide (creo que se debe a un mal montaje de la muestra en el porta muestra. Es decir no se hizo alineamiento con el cero del goniómetro.



Gráfica 24. Acoplamiento DRX a diversas temperaturas de Revenido.

16. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el tipo de material analizado en este documento, se realizó un ensayo no destructivo de dureza ROCKWELL C, Encontrando que a menor temperatura de revenido la resistencia que opone el material a ser penetrado es mayor, donde la caída de dureza es inversamente proporcional al aumento de temperatura.

Analizando el tipo de fractura después del ensayo destructivo Charpy y la prueba de dureza realizados en las probetas del acero SAE 5160, se obtuvo que a menor temperatura de revenido el tipo de fractura es frágil y a medida que se aumenta la temperatura tiene una transición de frágil a dúctil, obteniendo así en la máxima temperatura un tipo de fractura totalmente dúctil. Siendo este resultado proporcional a la energía absorbida por el material en donde a menor temperatura menor energía absorbida y a mayor temperatura mayor energía absorbida.

Las condiciones del material durante el tratamiento térmico cambian considerablemente sus propiedades. Después del temple a 850°C y revenido a 150°C y 200°C donde es notable la martensita empieza a evolucionar, y se puede evidenciar un reordenamiento de las placas con una tendencia a globulizarse, a la mitad del revenido el bandeado se hace más evidente lo mismo que la presencia de precipitados, lo cual da una microestructura más homogénea, ya finalizando el revenido La globulización de la cementita empieza a aparecer y la recrystalización de la ferrita empieza a hacerse notoria.

17. RECOMENDACIONES

Por ser un material comúnmente usado en el sector automotriz y en herramientas de corte, se recomienda continuar con dicha investigación de este documento, ya que el objetivo principal con la aplicación de las técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido y la Difracción de Rayos X, era de analizar la fragilidad del material durante la temperatura de revenido, pero durante el proceso no se pudo dar dicha afirmación.

El material comprado hace parte de uno de los cuatro proveedores de la empresa IMAL de Colombia, fabricantes de muelles y ballestas para vehículos, y uno de los afectados por dicha teoría, es importante hacer el mismo análisis con los proveedores restantes, para así tener una información más amplia y llegar a una solución.

18. BIBLIOGRAFÍA

- A, A. R. (2012). *Intercritically Austenitized Quenched And Tempered Ductile Iron*. Medellin.
- A. Corredor, B. C. (7 de Junio de 2016). *Ensayos de Dureza Rockwell y Brinell*. Obtenido de Ensayos de Dureza Rockwell y Brinell: www.slideshare.net/BrayanTangarife/dureza-rockwell-y-brinell
- Adruschitz, R. A. (2012). Intercritically Austenitized Quenched And Tempered Ductile Iron. *American Foundry Society*, 7-8. Obtenido de http://www.afsinc.org/files/AFS/IJMC/01_Aristizabal_Fall2012_no-crops.pdf
- Apraiz, J. (1997). *Tratamientos Térmicos de los Aceros*. Madrid (España): Limusa.
- Aristisabal R., F. R. (s.f.). *intercritically austenitized quenched and tempered ductile iron*. medellin.
- Caracterización Mecánica, Metalográfica y Tribológica de un Buje Metálico del Cable Aereo de Manizales. (2016). *Scientia et Technica*, 1-6.
- Colombiana, N. T. (10 de Julio de 2016). Materiales Metálicos, Ensayo de Dureza, Ensayo Superficial Rockwell (escalas 15N - 45T). *Materiales Metálicos, Ensayo de Dureza, Ensayo Superficial Rockwell*. Bogotá DC., Colombia.
- community, S. (2 de 7 de 2016). AZO MATERIALS. Obtenido de AZO MATERIALS: www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6743
- Cona, M. (2005). Ensayos Destructivos y no Destructivos de Probetas de Acero soldadas con Electrodo Revestidos. *Universidad Austral de Chile*.
- D. Borges, J. V. (2010). Influencia del Contenido de Fósforo y de Enfriamiento/Temperaturas de Revenido en Tenacidad a la Fractura y Resistencia . *Esteria*, 10.
- Douglas, C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos*. Montgomery: Limusa wiley S.A.
- E. Santos, J. R. (2001). Acerca del Ensayo de Dureza. *Notas Científicas*, 73-80.
- F. Ballen, E. G. (2010). Efecto de la Temperatura de Revenido en el Acero SAE 5160 en la Resistencia al Impacto.
- F. Correa, C. R. (2007). Mejoramiento de las Propiedades Mecánicas de los Aceros SAE 5160, 4140 y S600 con Recubrimientos Multicapas de Ti/TiN preparadas con Magnetron Sputtering. *Mejoramiento de las Propiedades Mecánicas de los Aceros SAE 5160, 4140 y S600 con Recubrimientos Multicapas de Ti/TiN preparadas con Magnetron Sputtering*. Popayán, Cauca, Colombia.

-
- Frankl, V. E. (1990-2003). El encuentro de la Psicología Individual con la Logoterapia. En *Logoterapia y analisis existencial*. (págs. 259- 280). Barcelona: Herder.
- G. Gonzales, R. I. (2006). Análisis y Simulación de la Prueba de impacto Tipo Charpy en Aceros al Carbon. En R. I. G. Gonzales, *Análisis y Simulación de la Prueba de impacto Tipo Charpy en Aceros al Carbon* (pág. 10). Guanajuato Mexico D.F.
- G. Martinez. (2015). *Temple Intensivo de un Acero AISI/SAE 5160*. Monterey México.
- Gran Diccionario de la Lengua Española*. (3 de Septiembre de 2016). Obtenido de thefreedictionary: <http://es.thefreedictionary.com/constituyentes>
- H. hernandez, A. V. (2004). Mejoramiento del Proceso de Granallado para Resortes de Ballesta utilizando Medición de esfuerzos Residuales por Difracción de rayos x en Acero SAE 5160H. *Mejoramiento del Proceso de Granallado para Resortes de Ballesta utilizando Medición de esfuerzos Residuales por Difracción de rayos x en Acero SAE 5160H*. Bogotá, D.C., Colombia.
- I. Gómez. (2017). *Centro de Asistencia a la Investigación*. Obtenido de Centro de Asistencia a la Investigación: www.ucm.es/tecnicasgeologicas/difraccion-de-rayos-x-drx
- Industries, A. (11 de Noviembre de 2015). *Temple y Revenido*. Obtenido de Temple y Revenido: <http://www.trateriber.es/pdf/Temple-Revenido.pdf>
- Ingeniería, E. C. (2008). *Maquina de Impacto*. Bogotá DC.: Laboratorio de Producción.
- Internacional, A. (2004). *Metallography and Microstuctures* . USA: ASM Handbook Committee.
- Investigación, S. T. (23 de Noviembre de 2012). *Tecnica de Analisis Químico Superficies-Espectrometría de dispersión de energía de Rayos X (EDS)*. Obtenido de Tecnica de Analisis Químico Superficies-Espectrometría de dispersión de energía de Rayos X (EDS): ssyf.ua.es/es/formacion/documentos/cursos-programados/2012/especifica/tecnicas-instrumentales-en-el-analisis-de-superficie
- J. Martinez. (2011). Caracterización de la Tenacidad de Fractura bajo la Norma ASTM E 399-08 (Probeta Senb), en Aceros AISI-SAE 5160H. *Caracterización de la Tenacidad de Fractura bajo la Norma ASTM E 399-08 (Probeta Senb), en Aceros AISI-SAE 5160H*. Bogotá, D.C., Colombia.

-
- M Montoya, D. D. (1 de Mayo de 2013). *Diagrama Hierro Carbono*. Obtenido de Departamento de Metalografía de la Universidad Tecnológica de Pereira: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/5-diagrama-hierro-carbono/>
- M. Caldera, J. M. (2004). Ensayo de Impacto de Piezas de Fundición Esferoidal de Pequeño Espesor. *Matéria*, 66-72.
- M. montoya, D. D. (2013). *Metalografía-Universidad Tecnológica de Pereira*. Pereira.
- Morela, P. (1991). *Tratamientos Termicos de los Metales*. Barcelona: Macombo S.A.
- Nieco, H. (15 de mayo de 2012). *curso seleccion de aceros* . Obtenido de https://es.slideshare.net/andrexito_81/seleccion-de-aceros
- Ornelas, F. G. (Junio de 2013). Analisis De Aceros Por Microscopia Opticas. Mexico D.F. Obtenido de <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/12065/ANALISISACERO.pdf>
- Perez, W. (2012). Influencia del Tratamiento Térmico sobre la Evolución de los Carburos y los Presipitados de Borde de Grano en el Acero 5160H. *Influencia del Tratamiento Térmico sobre la Evolución de los Carburos y los Presipitados de Borde de Grano en el Acero 5160H*. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Pinzón, M. (2008). Principios de los Tratamientos Térmicos para Aceros. Pereira, Risaralda, Colombia.
- Sanz, A. (Julio de 1995). Desarrollo de un Modelo Teórico para la Interpretación de Difractogramas de Rayos X de Alta Resolución . *Desarrollo de un Modelo Teórico para la Interpretación de Difractogramas de Rayos X de Alta Resolución* . Madrid, España.
- V. Morales, A. M. (2014). Principios y Practica de la Microscopía Electronica. Bahia Blanca, Argentina.
- W. Perez, J. O. (2013). Influencia de las Condiciones del Tratamiento Térmico sobre las Propiedades Mecánicas del Acero 5160H. *Repositorio Académico*, 23-31.
- William F Smith, J. H. (2004). *Fundamentos De La Ciencia E Ingenieria De Materiales* (4 ed.). Mexico : Mc Graw Hill. Obtenido de <https://chirinoosilveroer.files.wordpress.com/2012/05/fundamentos-de-la-ciencia-e-ingenieria-de-materiales-4ta-edicion-3b3n-william-f-smith-javad-hashemi.pdf>

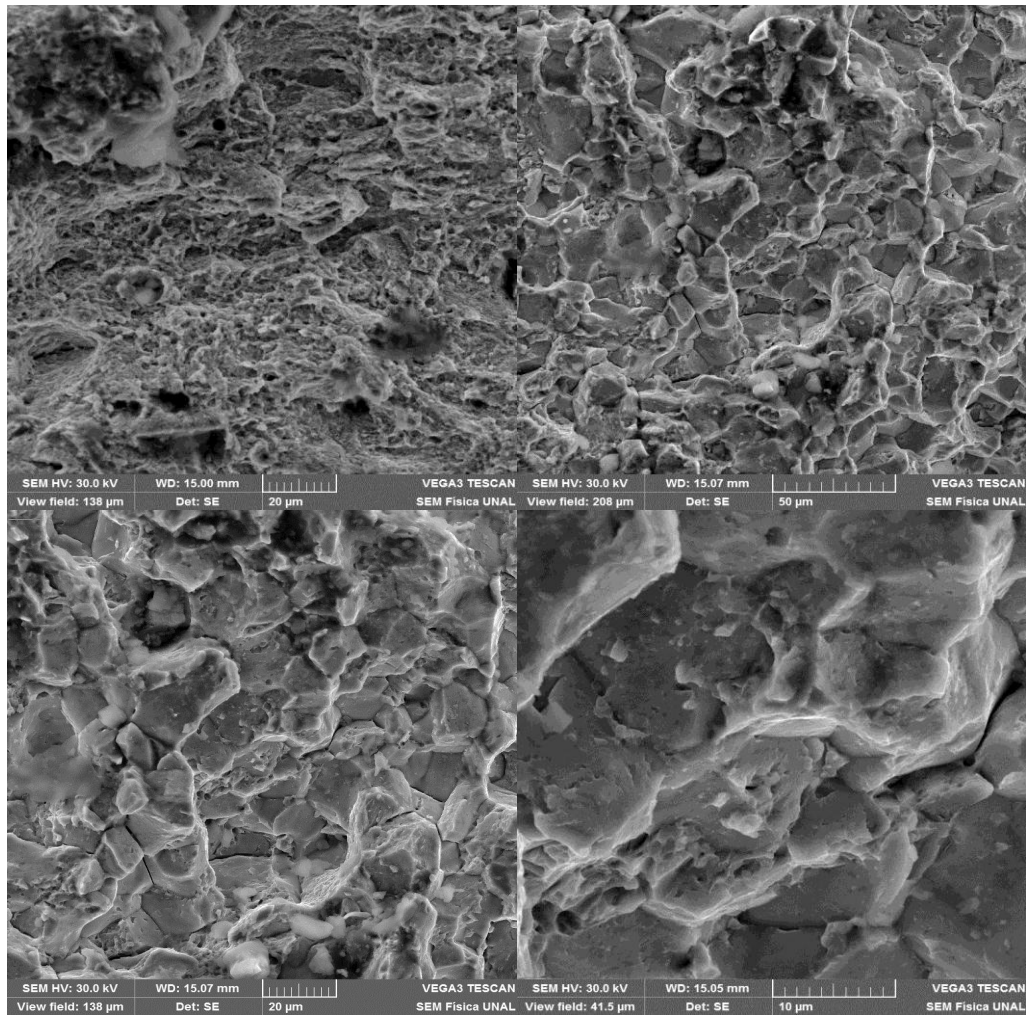
William, F. (1993). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. USA: Mc Graw-hill 2da Ed.

Wordpress.com. (1 de Septiembre de 2017). *La Ciencia de los Materiales Aplicada a la Forja*. Obtenido de La Ciencia de los Materiales Aplicada a la Forja: <https://laboratoriodeforja2.wordpress.com/une-f-1431-sae-5160/>

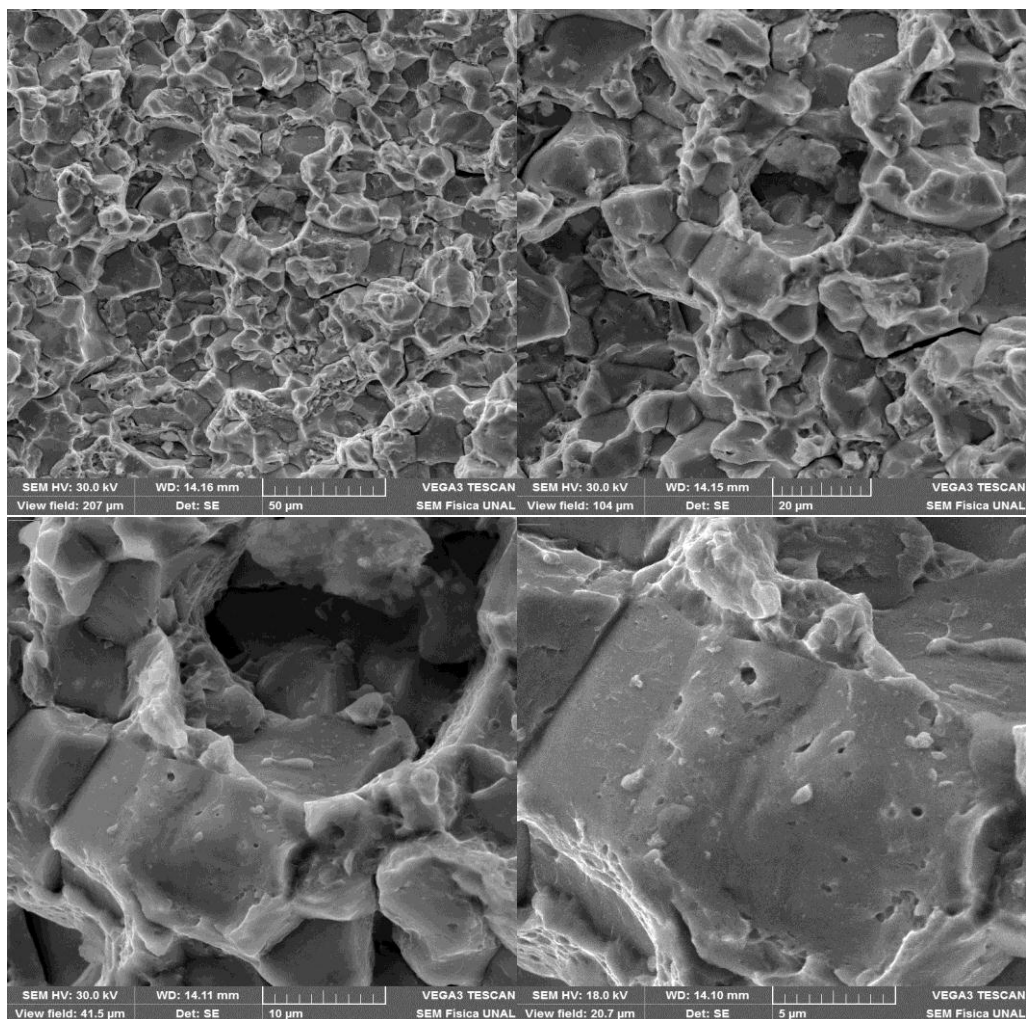
Anexos

PROBETA A 150°C

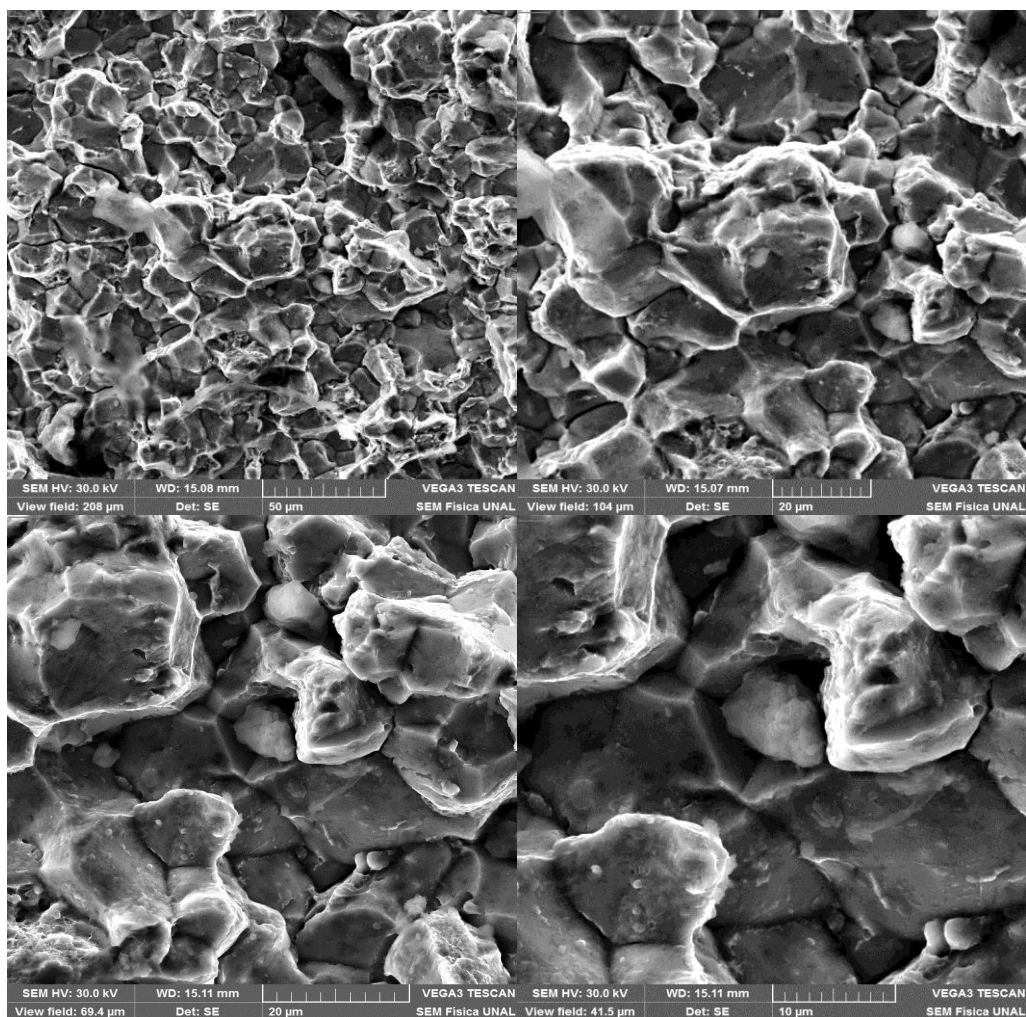
IMÁGENES LABORATORIO DE SEM.



PROBETA A 200°C
LABORATORIO DE SEM.

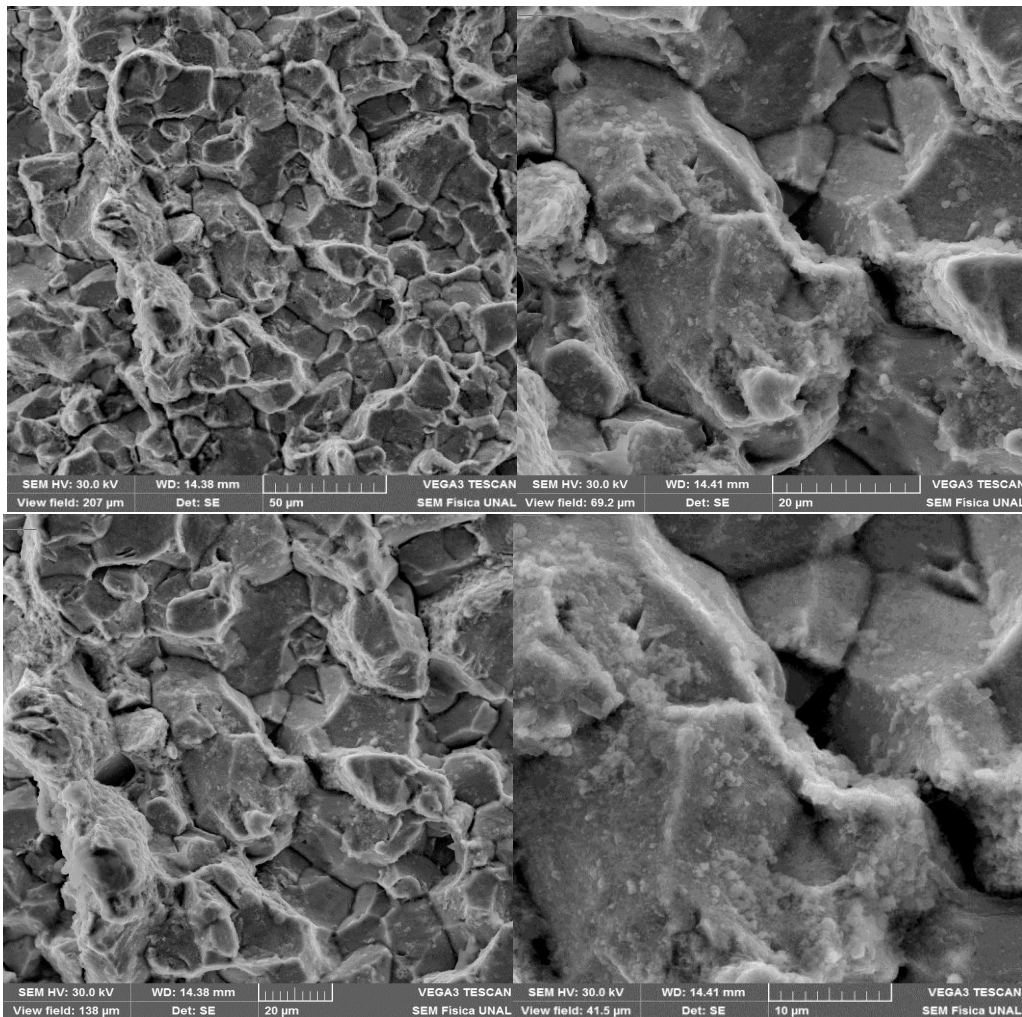


PROBETA A 250°C
LABORATORIO DE SEM.



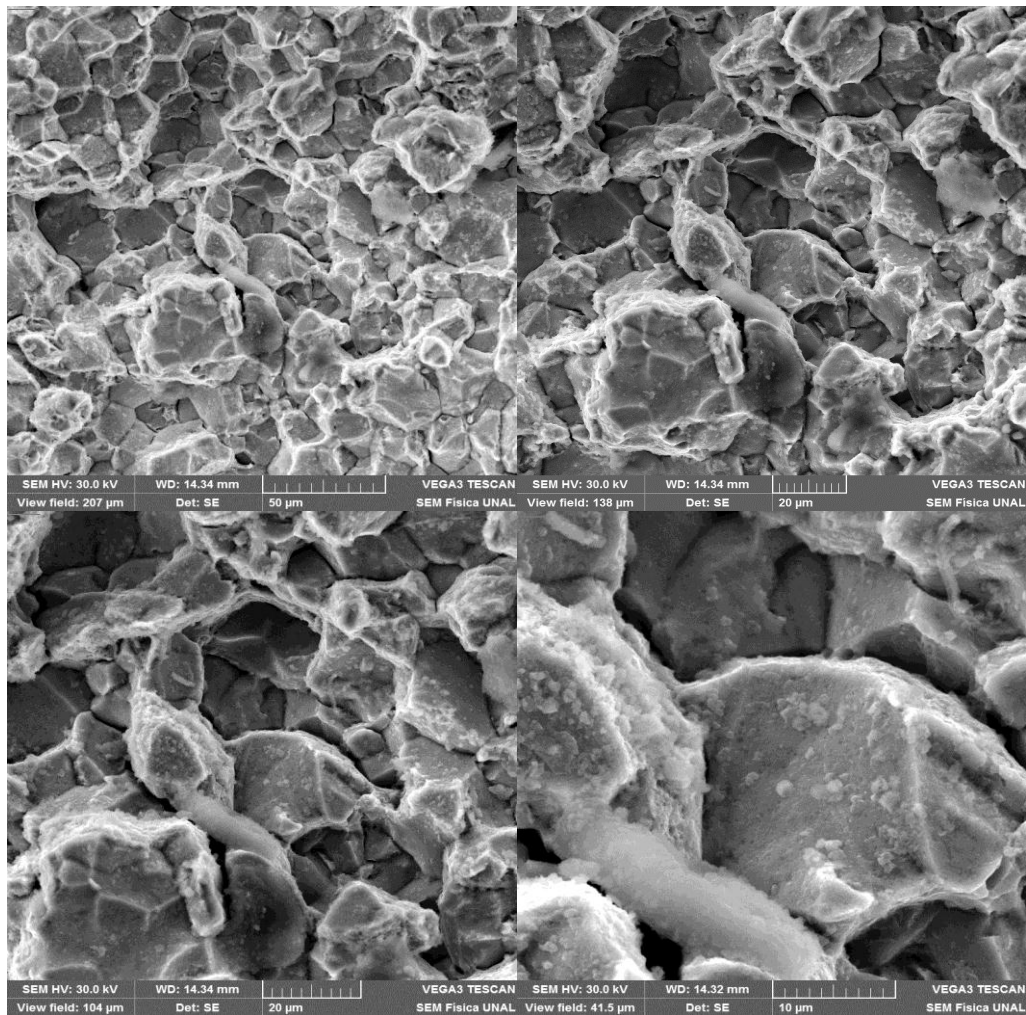
PROBETA A 300°C

LABORATORIO DE SEM.



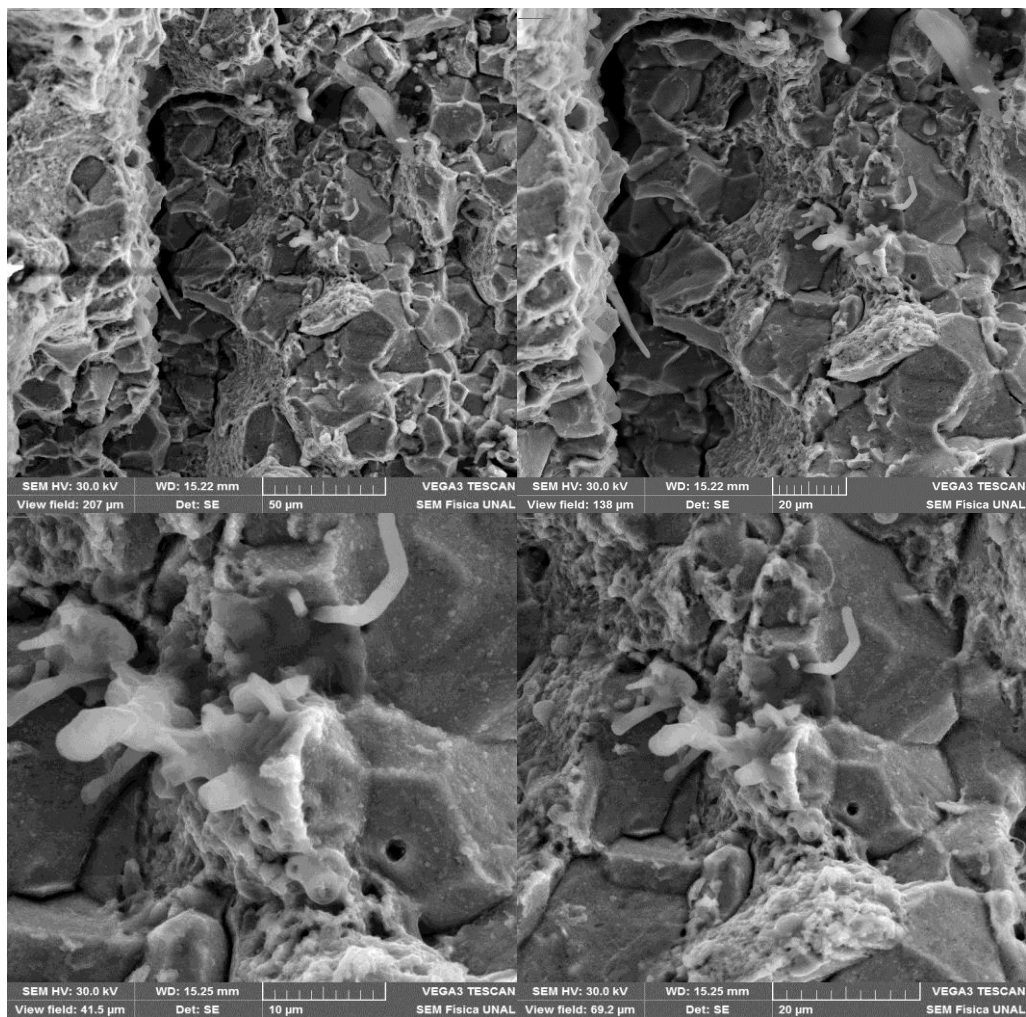
PROBETA A 350°C

LABORATORIO DE SEM.



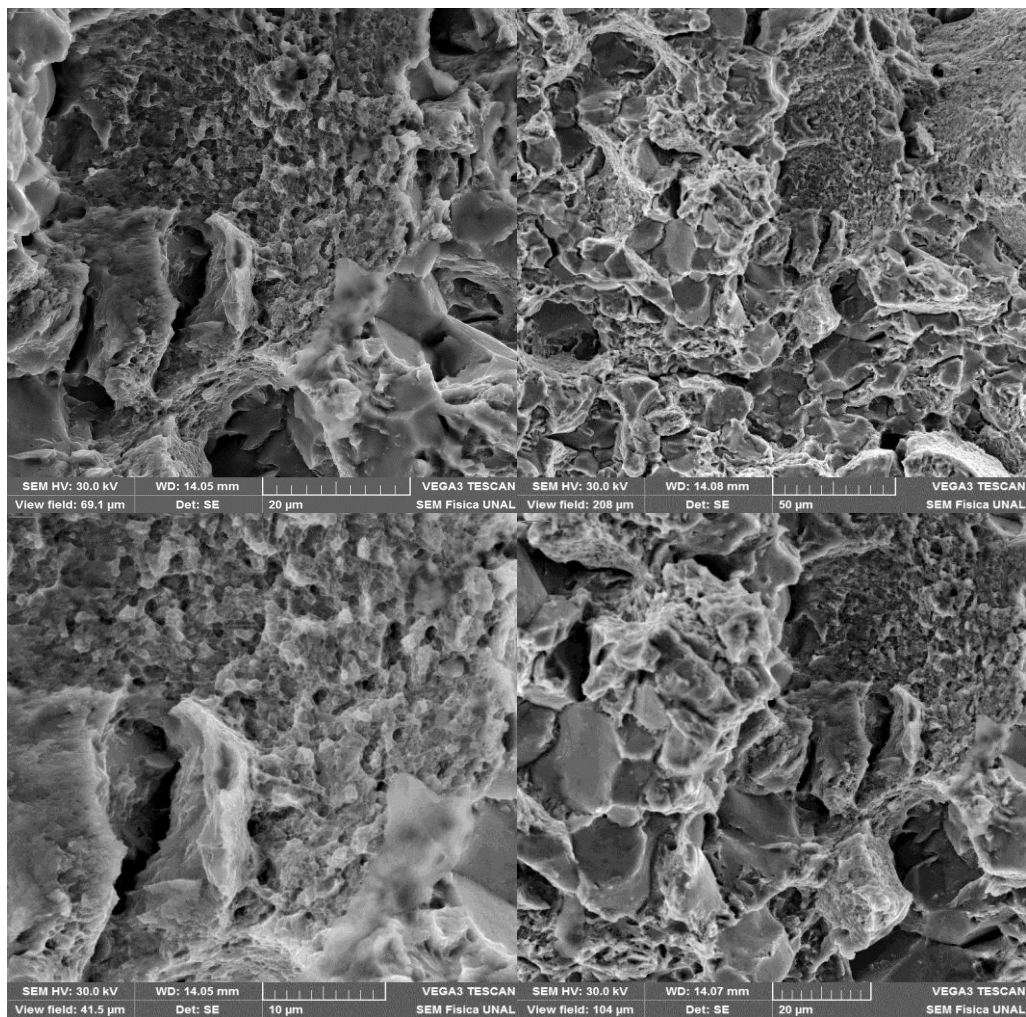
PROBETA A 400°C

LABORATORIO DE SEM.



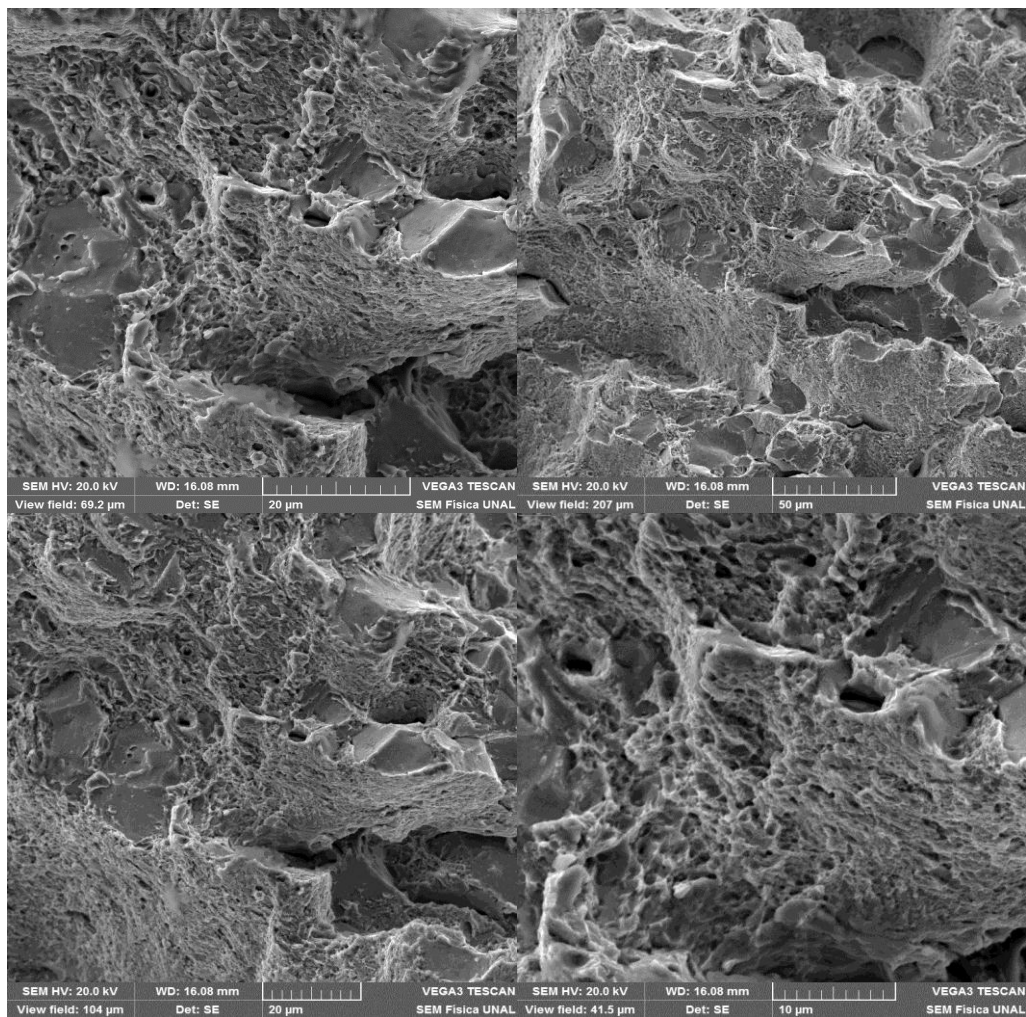
PROBETA A 450°C

LABORATORIO DE SEM.



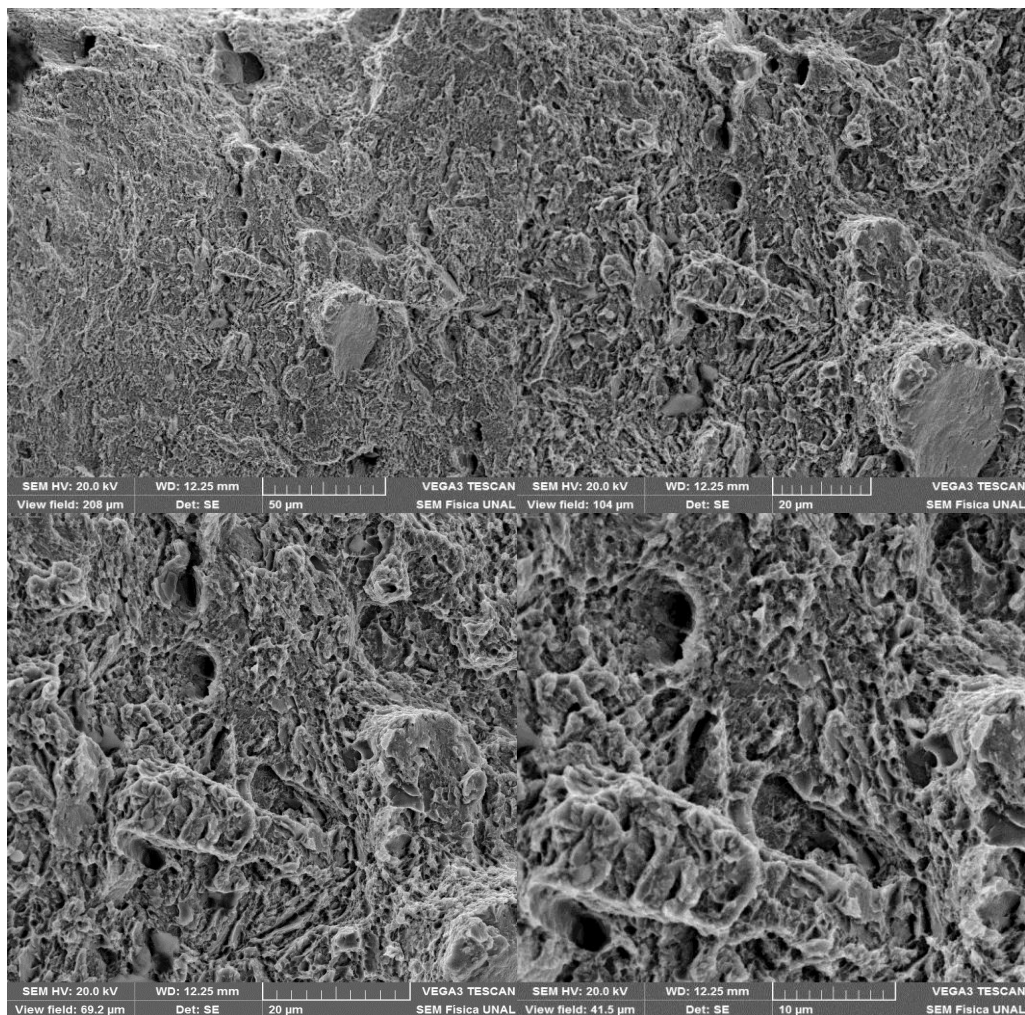
PROBETA A 500°C

LABORATORIO DE SEM.



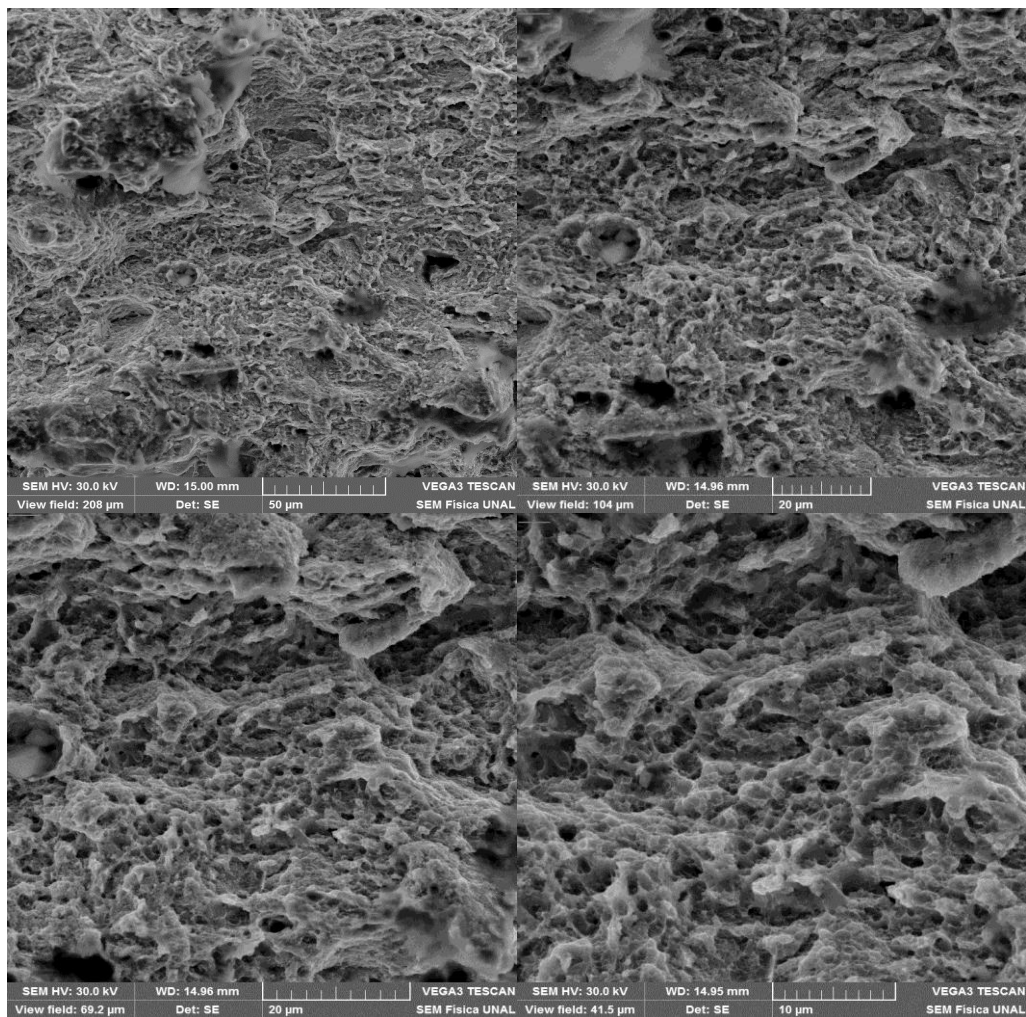
PROBETA A 550°C

LABORATORIO DE SEM.



PROBETA A 600°C

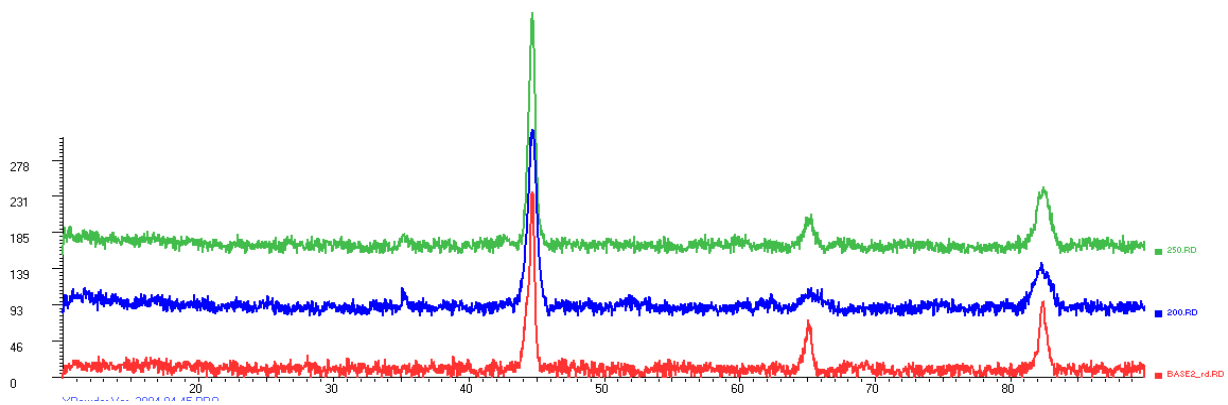
LABORATORIO DE SEM.



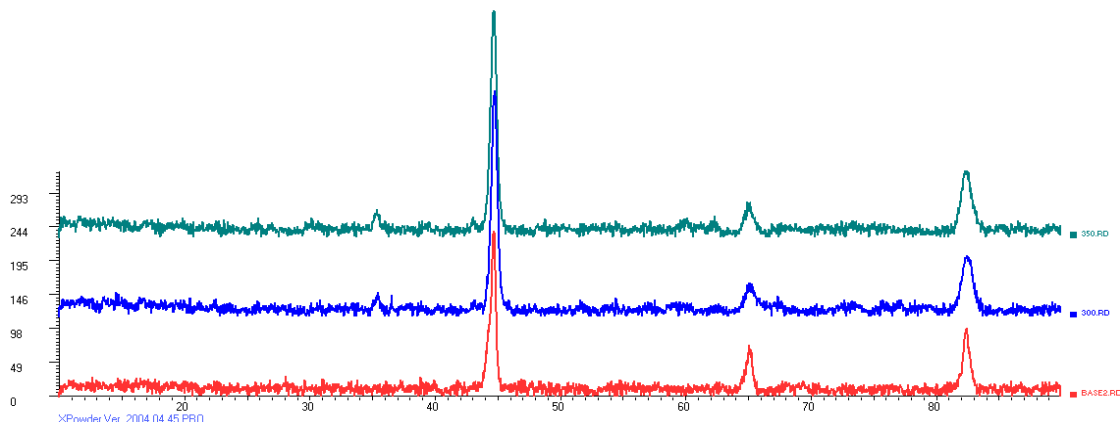
GRAFICOS COMPARATIVOS ENTRE TEMPERATURAS DE REVENIDO

En las siguientes gráficas se hacen comparaciones entre las temperaturas de revenido para así ver la similitud de los picos durante la técnica aplicada, y afirmar la transformación de la martensita a ferrita, y presencia de algunos contaminantes.

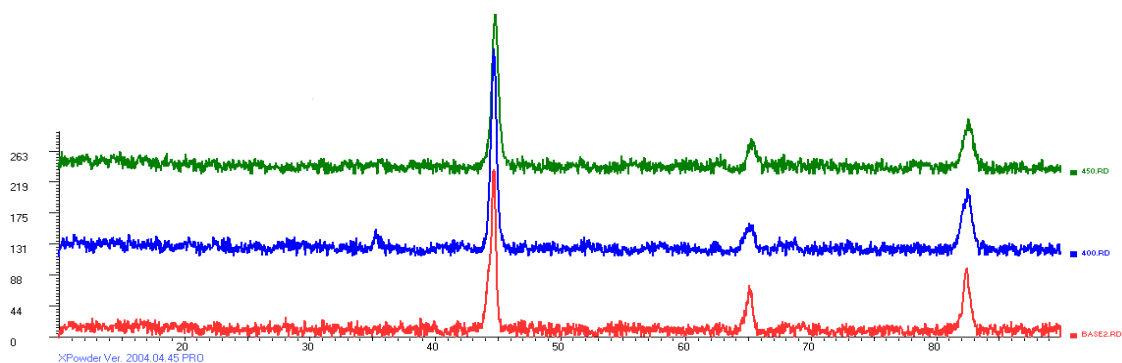
- **Comparativo entre Base (rojo) 200°C (azul) y 250°C (verde).**



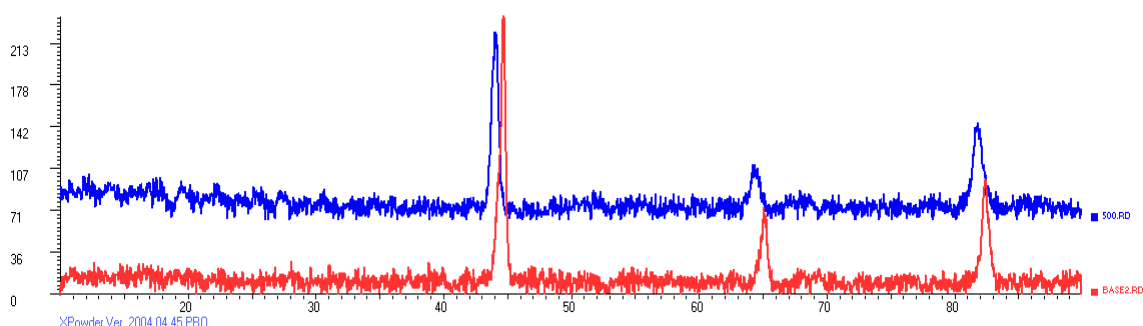
- **Comparativo entre Base (rojo) 300°C (azul) y 350°C (azul marina).**



- Comparativo entre Base (rojo) 400°C (azul) y 450°C (verde).



- Comparativo entre Base (rojo) y 500°C (azul)



- Comparativo entre Base (rojo) y 600°C (azul).

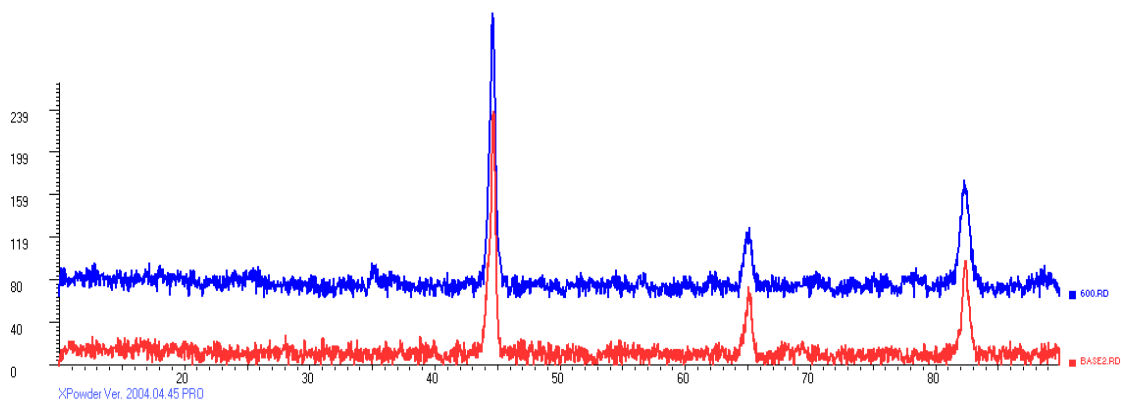
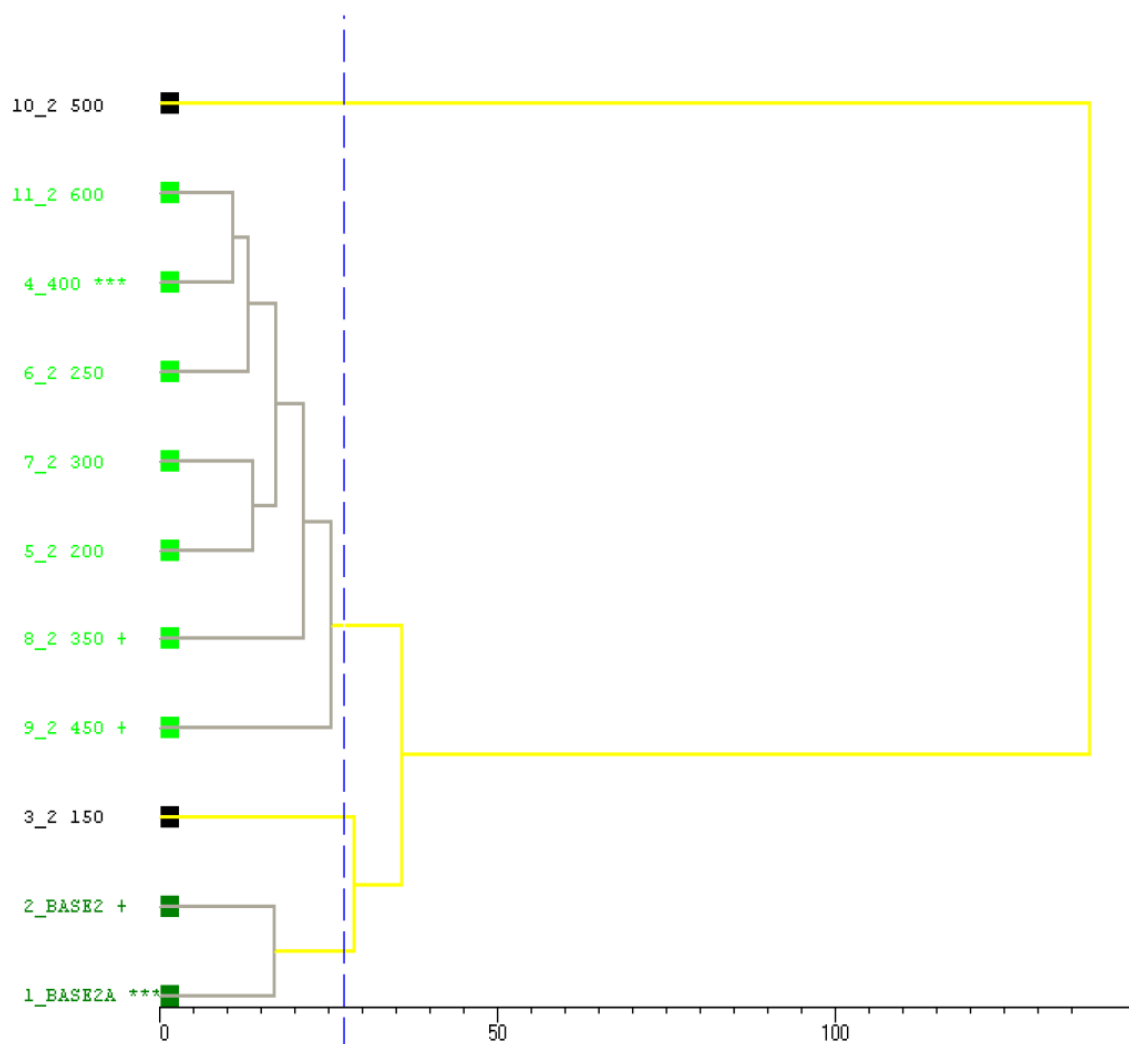


TABLA COMPARATIVA GENERAL ENTRE LAS GRÁFICAS DE LAS DISTINTAS TEMPERATURAS DE REVENIDO

Ahora se presenta unos análisis comparativos de todas las muestras, las líneas de conexión que tienen un mismo color representan o señalan la semejanza entre las muestras comparadas, a este esquema se le llama dendrograma. De acuerdo con esta semejanza encontrada se agrupan los datos.



La escala muestra en que rango de 20 se ha encontrado la semejanza. Como se puede ver la mayor concordancia está en el pico más intenso es por eso que todos los archivos están entrelazados por la línea amarilla.